

Національний авіаційний університет  
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах  
рукопису

**ДУДНІК АНДРІЙ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 531.7.08:004.7

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**НАУКОВІ ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ**  
**ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН**

05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин  
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело  
\_\_\_\_\_ А. С. Дуднік

Науковий консультант \_\_\_\_\_ Квасніков Володимир Павлович,  
доктор технічних наук, професор, Заслужений метролог України

Київ – 2019

## АНОТАЦІЯ

Дуднік А.С. Наукові основи комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 «Прилади та методи вимірювання механічних величин». – Національний авіаційний університет, Київ. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – 2019.

У дисертаційній роботі отримано такі нові наукові результати.

Вперше сформульовані нові принципи побудови приладових систем із включенням безпроводних сенсорних пристроїв для вимірювання механічних величин, що базуються на отриманні альтернативних показників вимірювання, завдяки функції локалізації сенсорів у складі комп'ютеризованої приладової системи;

Вперше розроблені нові підходи для вирішення проблеми визначення принципу дії мікропроцесорних первинних вимірювальних перетворювачів, що включені до складу безпроводних сенсорних пристроїв, для створення комп'ютеризованих приладових систем на їх основі та складені рівняння оцінки їх похибок;

Вдосконалено модель визначення відстані на основі часу прибуття сигналу, що дає змогу оцінювати відстань по передньому фронту імпульсу та оцінити похибку з врахуванням перешкод;

Вдосконалено комп'ютеризований лазерний далекомір, до складу якого включено безпроводний сенсорний інтерфейс, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох альтернативних показників;

Вперше розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем, з метою підвищення точності при передачі даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах (захищено патентами України на

корисну модель № 60400 і № 69626);

Дістала подальший розвиток методика локалізації безпроводних сенсорів, що дає змогу оцінити відстань між сенсорного пристрою БСПСми, час проходження сигналу між ними, та кут, що в поєднанні з лазерними далекомірами утворює тахеометричну сенсорну приладову систему;

Дістала подальший розвиток методика визначення відстані між об'єктами в умовах відсутності прямої видимості, що відрізняється від існуючих методів далекометрії тим, що світловий випромінювання, який в них застосовується, не здатний розповсюджуватись по криволінійним траєкторіям.

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження спирається на те, що:

Вперше розроблено математичну модель для дослідження процесу вимірювання відстані в БСПС у поєднанні з блоками лазерного далекоміра. Вхідними параметрами з боку сенсорної БСПС є потужності відправленого та прийнятого сигналу, а з боку лазерного далекоміра – швидкість світла у вакуумі, показник переломлення середовища та час проходження променя до цілі і назад. Вихідними параметрами, в обох випадках, є відстань між об'єктами, що отримана двома різними методами. Це дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю, шляхом співставлення вихідних параметрів, а саме похибка  $\delta \approx 0,2\%$ , що є допустимим для ділянки 250x250 м;

Модернізовано структурну схему сенсорного безпроводного пристрою, шляхом включення в її склад блоків лазерного далекоміра. Що дає можливість отримати альтернативне значення відстані між об'єктами. Це дало змогу, при сталих перешкодах, знизити похибку вимірювання у 2,5 рази, застосовуючи для співставлення дані сенсорної БСПС та лазерного далекоміра;

Розроблено математичну модель визначання відстані між сенсорними прийомопередавальний пристроями, на основі часу прибуття сигналу, а також проведено оцінку похибки визначення часу прибуття сигналу по передньому фронту імпульсу, а також визначено основні параметри, що на неї впливають;

Розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих

сенсорних вимірювальних систем, що у порівнянні з існуючими дозволяє збільшити дальність вимірювань до 15 – 17 м, при цьому показники похибки зберігаються в межах  $\delta \approx 0,2\%$ , при загальній дальності 160 м;

Розроблено маршрутний сенсорний прилад, що здатний перерозподіляти вимірювальні сигнали, з метою уникнення помилок при обробці даних вимірювання механічних величин в комп'ютеризованій сенсорній приладовій системі;

Модернізовано сенсорний вимірювальний пристрій, ввівши до їх складу мікропроцесорні первинні перетворювачі, що дозволяє більш точно аналізувати похибку вимірювань.

Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємстві ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» та у навчальний процес в Національному авіаційному університеті (м. Київ) при викладанні дисциплін “Фізичні основи сучасної метрології” і “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка”.

Наукова новизна та практична цінність результатів дослідження підтверджується двома патентами України № 60400 і № 69626.

У **вступі** аргументовано актуальність проблематики роботи, описано взаємозв'язки обраного спрямування з науковими планами, аспектами, напрямками, викладено мету та задачі досліджень, викладено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, сформульовано особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію, опубліковані праці за напрямком досліджень та застосування результатів роботи.

У **першому розділі** проведено загальний аналіз приладів для визначення позиції об'єкта, а також комп'ютеризованих приладових систем, що мають в своєму складі безпроводні сенсорні прилади. Проаналізовано лазерні далекоміри та розглянуто мікропроцесорні первинні перетворювачі лінійно-кутових величин, що в них застосовуються. Розглянуто структуру електронних тахеометрів, їх принцип дії, зовнішню будову, а також структурну схему взаємодії його основних частин.



У **другому розділі** розглянуто методику вимірювання механічних величин, що поєднує методи оцінки відстані та кута, обчислення позиції розташування та алгоритми локалізації.

Розроблено моделі, методи та рекомендації вимірювання лінійно-кутових величин на основі часу прибуття сигналу та падіння його потужності. Визначено, що вибір методу оцінки відстані між вузловими пристроями в системах визначення позиції є вирішальним показником, що позначається кількісних параметрах БСПС. Зазвичай, щоб оцінити точне розташування вузлового пристрою потрібно використовувати принаймні три оцінки відстані. Проте з протилежного боку, якщо б тільки достовірність даних засобів найбільше бралася до уваги, тоді можна було б застосовувати TDoA, при використанні якого величина похибок буде найнижчою. Та такі складові як площа і вартість вузлових пристроїв мають також бути враховані. Визначено, що результат рішення поставленої математичної задачі визначення координат в БСПС, незалежно від алгоритму визначення координат, залежить від ряду початкових умов : наявність базису (об'єктів з відомими координатами), точність вимірювання відстаней, рівномірність і щільність розподілу об'єктів БСПС. Виявлено, що точність вимірювання відстаней залежить від способу оцінки відстані.

У **третьому розділі** запропоновано використання, разом з безпроводними сенсорними вузловими пристроями, технічних засобів, що зазвичай входять до складу різного роду світло і радіо далекомірів та електронних тахеометрів, такі як мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-кутових величин на основі частоти, фази та потужності сигналу, з метою створення, на їх основі, комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин.

Побудовано математичну модель роботи цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу. Розроблено структурну схему цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу, з урахуванням математичної

моделі. Обґрунтовано застосування методу вимірювання відстані між об'єктами на основі порівняння потужності відправленого та прийнятого сигналів. Запропонована структурна схема пристрою для вимірювання потужності відправленого та прийнятого сигналів.

У **четвертому розділі** розглянуто моделі, методи і технології побудови та застосування комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин, з метою контролю параметрів тих чи інших побутових, промислових та спеціальних приладів, що використовують ті чи інші служби. Методи покращення їх метрологічних характеристик та підвищення їхньої продуктивності.

Модернізовано структурну пристрою координатора БСПС, шляхом включення в її склад блоків лазерного далекоміра. Що дає можливість отримати альтернативне значення відстані між об'єктами.

Розроблено модель кінцевого пристрою БСПС, що відрізняється тим, що сенсорний блок дає змогу надавати керуючому блоку дані про географічне положення, а також елемент живлення, що забезпечує автономність пристрою.

Запропоновано використовувати в метод вимірювання відстані між об'єктами, на основі падіння рівня радіосигналу між сенсорного пристрою БСПСми, застосовуючи мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі падіння потужності сигналу, в сенсорному комп'ютеризованому приладу вимірювання відстані.

Розглянуто застосування методу перебудови частоти (FHSS – Fast rate frequency hopping) і дворівневу частотну модуляцію з фільтром, що використовує метод Гауса (GFSK – Gaussian Frequency Shift Keying), для радіообміну показниками вимірювання в БСПС.

У **п'ятому розділі** Дано оцінку похибці вимірювання частоти, при вимірюванні високих і низьких частот. Визначено, що при дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот для досягнення заданої точності доцільно в діапазоні високих частот застосовувати цифровий ППЧС, а

в низькочастотному спектрі застосовувати вимірювання часових характеристик таких, як період.

Проведено дослідження та побудовано графіки похибок квантування при вимірюванні частоти та періоду. Побудовано алгоритм роботи мікропроцесорного ППЧС, що дозволяє досліджувати періодичні процеси у широкому діапазоні. Проведено аналіз похибки квантування цифрового ППЧС та визначено верхню і нижню межу вимірювань. Проаналізовано принцип роботи цифрового ППЧС, та виявлено, що різницю часу між ультразвуковим та радіосигналом, яка використовується для визначення відстані між об'єктами, можна визначити, за різницею періодів цих сигналів.

Описані експериментальні дослідження комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин, що описані в попередніх розділах. Наведенні ілюстрації зовнішнього вигляду, а також моделі та функціональні схеми їх внутрішньої будови.

Досліджено, що адаптований алгоритм «Зважені черги» за критеріями пропускної спроможності каналів передавання, максимальної швидкості передавання показників, дальності передавання показників, кількості підканалів у 2 рази кращий, ніж інші.

Проведено експерименти з математичною моделлю для дослідження процесу вимірювання відстані в БСПС у поєднання з блоками лазерного далекоміра. Це дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю, а саме похибка  $\delta \approx 2$  м, що є допустимим для ділянки 250x250 м.

**В загальних висновках** підсумовано основні результати досліджень, проведених у дисертаційній роботі, як теоретичних, так і експериментальних, отриманих в лабораторних умовах.

**Ключові слова:** безпроводний сенсор, приладова система, лазерний далекомір, визначення відстані, первинний перетворювач, точність визначення позиції, оцінка похибки локалізації, формула Фрісса, фільтрація сигналів, метод підвищення продуктивності.

## SUMMARY

Dudnik A.S. Scientific fundamentals computerized sensor systems of measurement of mechanical quantities. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in speciality 05.11.01 «Instruments and methods for measuring mechanical quantities». – National Aviation University, Kiev. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". – 2019.

In the dissertation work the subsequent new scientific results were found:

For the first time, new principles for the construction of instrumentation systems with the inclusion of wireless sensor devices for measuring mechanical quantities based on the received alternative measurement indicators, due to the function of the localization of sensors in the computerized instrument system, are formulated;

New approaches for solving the problem of determining the principle of operation of microprocessor primary measuring transducers included in the wireless sensory devices have been technologically advanced for the first time for the creation of computerized instrument systems on their basis and compiled equations for estimating their errors;

The model of distance determination founded on the entrance period of the signal is improved, which enables to estimate the distance along the front of the impulse and to estimate the error with allowance for obstacles;

The computerized laser rangefinder has been improved, which includes a wireless touch interface, which allows to estimate the distance based on two alternative indicators;

For the first time, a method for increasing the productivity of computerized sensory calculating structures has been technologically advanced, in order to intensification the accuracy in transmitting measurement data, which may cause an unreliable estimation of error in sensory devices (protected by Ukrainian patents

for utility model No. 60400 and No. 69626);

The method of localization of wireless sensors was developed further, which enables to estimate the distance between the sensors, the time of the signal passing between them, and the angle which, in combination with the laser rangefinders, forms a tacheometric sensory device system;

The method of determining the distance between objects in the absence of direct visibility, which differs from the existing methods of remoteometry by the fact that the light ray used in them, is not able to propagate along curvilinear trajectories.

The applied meaning of the consequences of the paper is that:

For the first time a mathematical model was developed for studying the distance measurement method in wireless sensor networks in combination with blocks of a laser distance monitor. The input parameters of the sensor ACAS are the power of the sent and received signal, and from the laser distance amount - the speediness of sunny in a space, the index of the refraction of the medium and the time passage of the beam to the target and back. Output parameters, in both cases, are the distance between the objects obtained by two different methods. This allowed to obtain the results of research with sufficient accuracy, by comparing the initial parameters, namely the error  $\delta \approx 0.2\%$ , which is permissible for a section 250x250 m;

The structural scheme of the sensor wireless device has been upgraded, by including in its structure the blocks of the laser distalimeter. That gives an opportunity to get an alternative value of the distance between objects. This made it possible, at constant obstacles, to reduce the measurement error by 2.5 times, using for comparison the sensory ACAS and laser spacer data;

A mathematical model for determining the distance between sensory transceivers based on the arrival time of the signal is developed, as well as estimating the error of determining the arrival time of the signal along the front of the pulse, as well as determining the main parameters influencing it;

The method of increasing the productivity of computerized sensory measuring systems is developed, which, in comparison with existing ones, allows to increase the range of measurements up to 15 - 17 m, while the error rates are kept within  $\delta \approx 0,2\%$ , with a total distance of 160 m;

Route sensor device capable of redistributing measurement signals is developed, in order to avoid errors in the processing of measurement data of mechanical quantities in a computerized sensory device system;

The sensor measuring device has been upgraded by introducing microprocessor primary converters into them, which allows a more accurate analysis of the measurement error.

Theoretical and practical achievements of the work were implemented at the enterprise of PJSC "NPO" Kyiv Plant of Automation "and in the educational process at the National Aviation University (Kyiv) during the teaching of disciplines" Physical bases of modern metrology "and" Metrology and information-measuring technique ".

The scientific innovation and applied meaning of the consequences of work are confirmed by the three patents of Ukraine No. 60400 and No. 69626.

The primer substantiates the importance of the research problematic, shows the assembly of the selected course with the scientific programs, plans, themes, formulates the purpose and objectives of the research, presents the scientific novelty and practical value of the consequences got, determines the individual input of the candidate, gives information on difficult, journals on the theme of work and the use of investigation consequences.

In the **first section**, a general analysis of devices for determining the position of the object, as well as computerized instrumentation systems, which have in their composition of wireless sensory devices. The light diodes were analyzed and the microprocessor primary converters of linear angular quantities used in them were considered. The structure of electronic tacheometers, their principle of action, external structure, as well as the structural scheme of

interaction of its main parts is considered.

The **second section** discusses the method of measuring mechanical quantities, combining methods for estimating distance and angle, calculating location position and algorithms for localization.

Models, methods and recommendations for measuring linear angular variables based on the time of arrival of the signal and the decrease of its power are developed. It is determined that the choice of the method for estimating the distance between nodes in the localization system is an important factor affecting the performance of the system. Usually, to estimate the exact location of the site, you must use at least three distance estimates. But on the additional pointer, if only the accuracy of such methods was important, then we could only use the TDoA, which has the lowest errors. But factors such as size and cost (in terms of hardware, processor, and energy) nodes must also be taken into account. It is determined that the result of the solution of the set mathematical problem of determining the coordinates in the ACPS, regardless of the coordinate determination algorithm, depends on a number of initial conditions: the existence of the basis (objects with known coordinates), the accuracy of the distance measurement, the uniformity and density of the distribution of the objects of the ACPS. It is found that the accuracy of measuring distances depends on the method of estimating the distance.

The **third section** proposes the use, together with wireless sensor nodes, of technical means, which are usually included in the various types of light and radio distance meters and electronic tacheometers, such as a microprocessor primary converter of linear-angular variables based on the frequency, phase and signal strength, in order to creation, on their basis, of computerized systems for measuring mechanical quantities.

A mathematical model of the operation of the digital primary converter of linear angular variables was constructed on the basis of the instantaneous and average values of the frequency, as well as the phase of the signal. The structural

scheme of the digital primary converter of linear angular variables is developed on the basis of the instantaneous and average values of the frequency, as well as the phase of the signal, taking into account the mathematical model. The application of the method of measuring the distance between objects based on comparison of the power of sent and received signals is substantiated. The proposed structural scheme of the device for measuring the power of sent and received signals.

In the **fourth section**, models, methods and technologies of construction and application of computerized systems of measurement of mechanical quantities are considered, in order to control the parameters of certain household, industrial and special devices using those or other services. Methods of improving their metrological characteristics and improving their productivity.

The structural device of the ACPS coordinator has been upgraded, by including in its structure the blocks of the laser distance monitor. That gives an opportunity to get an alternative value of the distance between objects.

The model of the terminal block of the ACAS is developed, characterized in that the sensor unit enables the control unit to provide the geographic position, as well as the battery that provides the device autonomy.

It is proposed to use in the method of measuring the distance between objects, based on the fall of the level of radio signals between the sensors, using a microprocessor primary converter of linear angular variables based on the drop in signal strength, in a sensor computerized instrument measuring distance.

The application of the Fast Frequency hopping (FHSS) method and Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) two-level frequency modulation for the exchange of measured values in the ACPS are considered.

In the **fifth section**, an estimate is made of the measurement error of the frequency when measuring the high and low frequencies. It is determined that in the research of periodic processes in a wide frequency range to achieve the given accuracy it is expedient to use a digital frequency meter in the high frequency range, and to pass the period of measurement in the range of low frequencies.



Conducted research and constructed quantization error schedules during frequency and period measurement. The algorithm of microprocessor frequency meter operation, which allows to study periodic processes in a wide range, is constructed. The quantization error analysis of the digital frequency meter was performed and the upper and lower limits of measurements were determined. The principle of digital frequency meter operation is analyzed, and it has been found that the time difference between ultrasonic and radio signals used to determine the distance between objects can be determined by the difference in the periods of these signals.

Experimental studies of computerized sensory systems measuring mechanical quantities described in the previous sections are described. Presentation of illustrations of the appearance, as well as models and functional schemes of their internal structure.

It was investigated that the adapted algorithm "Weighted queues" according to the criteria of transmission capacity of transmission channels, the maximum rate of transmission of indicators, the transmission rate of metrics, the number of subchannels is 2 times better than others.

Experiments with the mathematical model for the study of the distance measurement in wireless sensor networks in conjunction with the units of the laser distance monitor were carried out. This made it possible to obtain the results of research with sufficient accuracy, namely the error  $\delta \approx 2$  m, which is permissible for a section 250x250 m.

The **general conclusions** review the key consequences of the investigation directed in the dissertation, both theoretic and investigational, found in workroom settings.

**Key words:** wireless sensor, instrumentation system, laser rangefinder, distance determination, primary converter, precision position determination, estimation of localization error, Frissa formula, signal filtering, productivity enhancement method.

## Список основних публікацій здобувача:

### Монографії

1. Дуднік А.С. Комп'ютеризовані системи вимірювання механічних величин [Текст] / А. С. Дуднік, В. П. Квасніков. – Київ : Інтерсервіс, 2018. – 176 с. – ISBN 978-617-696-830-6.

2. Kvasnikov V. Relevance analysis of measurement mechanical quantities in the composition of the network “internet of things” and systems of professional cooperation during metrological studies [Текст] /V. Kvasnikov, A. Dudnik, Yu. Bondarenko // Relevant issues of development and modernization of modern science: the experience of countries of Eastern Europe and prospects of Ukraine: **monograph** / edited by authors. – Riga, Latvia : Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2018. – P. 144 -159. [http://dx.doi.org/10.30525/978-9934-571-26-8\\_8](http://dx.doi.org/10.30525/978-9934-571-26-8_8) (іноземне видання)

### Статті у фахових виданнях

3. Дуднік А.С. Спосіб підвищення продуктивності безпроводових комп'ютерних мереж на основі міжрівневої взаємодії та пристрій для його реалізації [Текст] / А.С. Дуднік, Є.В. Шевцова, О.О. Зубарева // Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2011. – Вип. № 4 (36). – С. 45 – 50. (**РИНЦ, WorldCat, BASE**)

4. Дуднік А.С. Метод застосування протоколу БТР для надійності передачі даних безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко// Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. № 3 (43). – С. 22 – 26. (**РИНЦ, WorldCat, BASE**)

5. Дуднік А.С. Динамічний алгоритм у перерозподілу потоку заявок в безпроводових комп'ютерних мережах [Текст] /А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2016. – Вип. № 4. – С. 102-104.

6. Дуднік А.С. Аналіз декомпозиції нижніх рівнів еталонної моделі OSI на прикладі пристрою підвищення продуктивності безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] /А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 1. – С. 66-69.

7. Дуднік А.С. Математичні моделі прогнозування для хмарних комп'ютеризованих систем [Текст] / А.С. Дуднік, Л.І. Кубушка В.О. Погіба // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 3. – С.98 -103.

8. Квасніков В.П. Аналіз приладів вимірювання відстані та безпроводних сенсорних мереж [Текст] /В.П. Квасніков, А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 4. – С.115 -118.

9. Дуднік А.С. Розробка мікропроцесорного частотоміра для комп'ютеризованих систем вимірювання відстані [Текст] /А.С. Дуднік // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. № 1. – С.162 -167.

10. Дуднік А.С. Застосування датчиків вимірювання механічних величин в комп'ютерній мережі «Розумний дім» [Текст] /А.С. Дуднік // Метрологія та прилади . – 2017. – Вип. № 5. – С.106 -110. **(Index Copernicus)**

11. Квасніков В.П. Наукові основи визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] /В.П. Квасніков, А.С. Дуднік// Метрологія та прилади . – 2018. – Вип. № 3. – С.21 -26. **(Index Copernicus)**

12. Дуднік А.С. Модель сенсорного комп'ютеризованого приладу вимірювання відстані [Текст] / А.С. Дуднік, В.П. Квасніков // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 1 (81). – С.114 -118. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-114-118](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-114-118) **(Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE)**

13. Дуднік А.С. Розробка методу підвищення продуктивності сенсорних мереж вимірювання відстані [Текст] /А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 3/2 (41). – С.114 -118. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.135486> **(Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE, РИНЦ)**

14. Дуднік А.С. Дослідження лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] /А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 4/2 (42). – С.35 -40. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141190> **(Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE, РИНЦ)**

15. Дуднік А.С. Аналітична модель вимірювання відстані за допомогою сенсорних мереж та оцінка похибки вимірювання [Текст] / А.С. Дуднік, В.П. Квасніков // Вісник Черкаського державного технологічного університету . – 2018. – Вип. №2 . С. 21 -26.

16. Квасніков В.П. Визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] / В.П. Квасніков, А.С. Дуднік // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2018. – Вип. № 1(12). С. 54 -60.  
<https://doi.org/10.32684/2412-5288-2018-1-12-52-58>

17. Дуднік А.С. Методи визначення відстані між об'єктами сенсорних мереж [Текст] /А.С. Дуднік // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 17. С. 40 -49. **(Norwegian Register for Scientific Journals, BASE, Citefactor, GIF, SIS)**

18. Дуднік А.С. Метод вимірювання відстані між об'єктами сенсорних мереж засобами мікропроцесорного фазометра [Текст] /А.С. Дуднік // Технічні науки та технології. – 2018. Вип. № 2(12). С. 136 -141.  
[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-136-141](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-136-141) **(Index Copernicus, OJS, ResearchBib, WorldCat, BASE ПИИЦ)**

19. Dudnik A. Method for measuring the distance between objects using a digital frequency measuring device [Текст] / A.Dudnik // European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2018. # 4. P. 19 -24. **(ULRICHSWEB, BASE, EBSCO, eLIBRARY.RU, OpenAIRE, RePEc, ROAR, WorldCat)** (іноземне видання)

20. Dudnik A. Evaluation of wireless signal computerized systems of measurement of mechanical quantities at constant distance in medium fire [Текст] /A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2018. # 21. Vol. 2. P. 56 -60. **(Slideshare, eLIBRARY.RU, Issuu, Calameo)** (іноземне видання)

21. Dudnik A. Models and methods of growth of productivity of wireless networks in components of computerized systems of measurement of mechanical

quantities [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Sciences of Europe. – 2018. # 29. Vol. 2. P. 54 -60. **(DIIF, eLIBRARY.RU, GIF, Calameo, ISSUU, Slideshare)** (іноземне видання)

22. Dudnik A. Development microprocessor device measuring power for computer systems measure the distance [Текст] / A.Dudnik // Sciences of Europe. – 2018. # 28. Vol. 1. P. 64 -68. **(DIIF, eLIBRARY.RU, GIF, Calameo, ISSUU, Slideshare)** (іноземне видання)

23. Dudnik A. Development of mathematical models for the determination of to determine the distance between the nodes in sensor networks [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // East European Science Journal. – 2018. # 7(35). Vol. 2. P. 12 -14. **(Index Copernicus, eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI, Slideshare, Cosmos impact factor)** (іноземне видання)

24. Dudnik A. Method of devices wireless sensor networks and motion sensors for military purposes [Текст] / A.Dudnik, O. Cholishkina, Yu. Bondarenko // East European Science Journal. – 2018. # 6(34). Vol. 1. P. 37 -41. **(Index Copernicus, eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI, Slideshare, Cosmos impact factor)** (іноземне видання)

25. Dudnik A. Analysis of technology "internet of things" in the military sphere [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Colloquium-journal. – 2018. # 8(19). Vol. 1. P. 16 -19. **(Index Copernicus, ПИИЦ, Calameo, ISSUU, Slideshare)** (іноземне видання)

26. Dudnik A. Analysis technology "internet of things" as a means of mechanical quantities measurement system "smart home" [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Colloquium-journal. – 2018. # 7(18). Vol. 3. P. 29 -30. **(Index Copernicus, ПИИЦ, Calameo, ISSUU, Slideshare)** (іноземне видання)

27. Dudnik A. Modeling determine the distance between nodes in sensor networks computerized system for measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik // Spirit time. – 2018. # 8 Vol. 1. P. 14 -18. **(ПИИЦ, ScholarGoogle, Calameo, ISSUU, Slideshare)** (іноземне видання)

## ЗМІСТ

<b>АНОТАЦІЯ.....</b>	<b>2</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>8</b>
<b>СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>22</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>23</b>
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ В ГАЛУЗІ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН.....</b>	<b>36</b>
1.1. Загальний аналіз приладів вимірювання відстані.....	36
1.2. Лазерні далекоміри.....	43
1.3. Електронні тахеометри.....	53
1.4. Аналіз розвитку безпроводних сенсорних приладових систем як технології вимірювання механічних величин.....	59
Висновки до розділу 1.....	64
Перелік літератури до розділу 1.....	65
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ЗАСОБАМИ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ ПРИЛАДОВИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>72</b>
2.1. Аналіз методів оцінки відстані засобами безпроводних комп'ютеризованих сенсорних приладових систем.....	73
2.1.1. Метод оцінки відстані на основі вимірювання падіння потужності.....	73
2.1.2. Методи оцінювання відстані засобами безпроводних комп'ютеризованих сенсорних приладових систем на основі часу прибуття сигналу.....	76
2.1.3. Метод визначення координат на основі кута отриманого сигналу.....	78
2.2. Методи обчислення позиції розташування засобами безпроводних комп'ютеризованих сенсорних приладових систем.....	80
2.2.1. Метод трилатерації.....	91
2.2.2. Метод тріангуляції.....	95

2.2.3. Метод імовірнісних підходів.....	96
2.2.4. Метод обмеження квадрату.....	97
2.3. Алгоритми локалізації вузлових пристроїв безпроводних комп'ютеризованих сенсорних приладових систем та термінологія визначення поточного стану вузлового пристрою.....	98
2.4. Дослідження алгоритмів локалізації безпроводних сенсорних приладових систем.....	107
Висновки до розділу 2.....	114
Перелік літератури до розділу 2.....	116
<b>РОЗДІЛ 3. ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ ПРИЛАДОВИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН.....</b>	<b>122</b>
3.1. Прилади вимірювання відстані на основі часових характеристик.....	122
3.1.1. Мікропроцесорні первинні перетворювачі лінійно кутових величин на основі частоти сигналу.....	141
3.1.2. Мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі фази сигналу.....	147
3.2. Мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі потужності сигналу.....	149
Висновки до розділу 3.....	156
Перелік літератури до розділу 3.....	157
<b>РОЗДІЛ 4. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПОБУДОВИ І ТЕХНОЛОГІЇ ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН.....</b>	<b>164</b>
4.1. Методи підвищення точності вимірювання відстані в безпроводних сенсорних приладових системах.....	165
4.1.1. Шляхи підвищення точності методу вимірювання відстані на основі падіння потужності сигналу.....	165
4.1.2. Шляхи підвищення точності методу вимірювання відстані на основі часу прибуття сигналу.....	168

4.2. Технології побудови комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин.....	172
4.2.1. Технологія розгортання безпроводних сенсорних приладових систем та класифікації її пристроїв.....	172
4.2.2. Метод підвищення продуктивності маршрутних пристроїв....	173
4.2.3. Метод підвищення продуктивності пристроїв-координаторів.	185
4.2.4. Метод підвищення продуктивності та точності вимірювань кінцевих пристроїв.....	190
4.3. Технологія «Розумний будинок».....	198
Висновки до розділу 4.....	205
Перелік літератури до розділу 4.....	207
<b>РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН.....</b>	<b>214</b>
5.1. Аналіз похибок мікропроцесорних первинних перетворювачів при вимірюванні відстані.....	214
5.1.1. Аналіз похибок мікропроцесорного первинного перетворювача на основі миттєвих значень частоти сигналу.....	214
5.1.2. Аналіз похибок мікропроцесорного первинного перетворювача на основі середніх значень частоти сигналу.....	220
5.2. Дослідження процесу вимірювання відстані засобами комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин та аналіз кінцевого пристрою.....	222
5.3. Дослідження методу підвищення продуктивності маршрутних пристроїв.....	227
5.4. Дослідження методу підвищення точності пристроїв концентраторів.....	231
Висновки до розділу 4.....	239
Перелік літератури до розділу 4.....	241



<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>246</b>
<b>Додаток А.</b> Акт про впровадження на підприємстві ПАТ «НВО «Київський завод автоматики».....	249
<b>Додаток Б.</b> Акт про впровадження у навчальний процес Національного авіаційного університету.....	251
<b>Додаток В.</b> Патент України на корисну модель "Пристрій підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю" .....	253
<b>Додаток Г.</b> Патент України на корисну модель "Безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок" .....	
<b>Додаток Д.</b> Нумерація каналів БСПС в не ліцензованому діапазонів.....	258
<b>Додаток Е.</b> Принципова схема MB-USBRIDGE-1.2.....	259
<b>Додаток Є.</b> Росташування компонентів RFSerialBridgey.....	260
<b>Додаток Ж.</b> Код програми визначення позиції вузлових пристроїв БСПС.....	261
<b>Додаток З.</b> Програмна реалізація методу вимірювання відстані між об'єктами за методом RSSI на мові С.....	265
<b>Додаток И.</b> Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	266

## СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

GPS – система глобального позиціонування (англ. Global Positioning System)

LLC (Logical Link Control) – відповідає за достовірну передачу показників вимірювань між вузловими пристроями БСПС

MAC – (Media Access Control) регулює доступ до поділюваного фізичного вимірювального середовища

OSI – (Open Systems Interconnection) – опорна еталонна модель, що є стандартом для опису функціонування відкритих систем, відповідно до якої здійснюється обмін показниками вимірюванню в БСПС

АСП – активний суміщений передавальний пристрій

БКВ – блок контрольного відліку

БСПС – безпроводні сенсорні приладові системи

ЕТ – електронний тахеометр

ЗМЧ – зразкова міра частоти

ІМ – імпульсний метод

КССВМВ – комп'ютеризовані сенсорні системи вимірювання механічних величин

НВЧ – надвисокі частоти

ОКЗ – оптичне коротке замикання

ОЛЗ – оптична лінія затримки

ФЕП – фотоелектронний помножувач

ФМ – фазовий метод

ЧМ – частотний метод

ППЧС – первинний перетворювач на основі частоти сигналу

ПППС – первинний перетворювач на основі потужності сигналу

ППФС – первинний перетворювач на основі фази сигналу

ПППерС – первинний перетворювач на основі періоду сигналу

## ВСТУП

Слово “сенсор” має англійське походження, і на даний час під поняттям “сенсор” розуміють будь-який електронний датчик або вузловий пристрій безпроводної вимірювальної системи, що здатен вимірювати ті чи ніші показники, в залежності від призначення.

В даний час проблема визначення позиції об'єкта з високою точністю при вимірюванні відстаней від декількох сантиметрів до декількох десятків метрів має змогу бути вирішена декількома способами.

Традиційні далекомірні системи, полягають у використанні імпульсного або безперервного електромагнітного випромінювання мають високу точність визначення відстані, але у зв'язку з великою швидкістю поширення електромагнітних хвиль застосування цього методу доцільно для вимірювання великих відстаней. Крім того, електромагнітне випромінювання впливає на роботу радіоелектронної апаратури, внаслідок чого сфера застосування обмежується областями, в яких не пред'являються високі вимоги щодо електромагнітної сумісності. Також, застосування цього методу не можливо в середовищах, що мають гарну провідність.

Тому у таких випадках більше підходять комп'ютеризовані сенсорні системи вимірювання механічних величин (КССВМВ), що є вагомим засобом пізнання фізичного світу. Їх вагомість має зв'язок з новими можливостями застосовування, що викликані наступними параметрами безпроводних сенсорів, як відсутність необхідності у кабельній інфраструктурі, мініатюрність вузлових пристроїв, висока енергоефективність, наявність безпроводного інтерфейсу, потужні мікропроцесори, відносна дешевизна. Наявність цих факторів зумовила їхнє широке використання у цілому ряді галузей народного господарства з ціллю покращення процесу автоматичного аналізу параметрів, їх дослідження, контролювання показників цілого ряду промислових та сільськогосподарських об'єктів.

Проблематика даної роботи звертає увагу на важливість пошуку нових теоретичних засад та засобів створення комп'ютеризованих приладових систем

вимірювання механічних величин, що можуть гарантувати нижчі похибки визначення параметрів та високу швидкість при знаходженні БСПС у несприятливому завадовому середовищі.

Дослідження в галузі розвитку методів і комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин ведеться в безлічі дослідницьких центрів України – в НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, КНУ ім. Т. Шевченка, НАУ, НУ «Львівська політехніка», НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», а також в університетах США (Carnegie Mellon University, Stanford University), Великобританії (University of Oxford), Німеччини (University of Bonn), Франції (INRIA), Австралії (The University of Sidney), Росії (МДТУ ім. Баумана, Інститут прикладної математики ім. М.В. Келдиша РАН, ЦНДІ робототехніки, Інститут проблем механіки РАН та МДТУ «Станкін») й інших країн.

Вони базуються на роботах науковців В.П. Кваснікова, В.С. Антонюка, В.П. Маслова, Ю.П. Зайченка, М.А. Виноградова, Ю.В. Кравченка, О.Г. Оксіюка, Ю.М. Мінаєва а також наукових колективів під керівництвом О.М. Безвесільної, Л.В. Коломійця, Ю.О. Подчашинського та В.І. Корсуна.

### **Актуальність теми**

На нинішній час, серед світових тенденцій, все більш поширеними стають "вимірювальні системи на основі безпроводних інтерфейсів". Поняття "комп'ютеризована сенсорна система" з'явилося лише останніми роками, але на даний час повністю закріпило за собою трмін (sensory device), що являє собою самоорганізовану структуру, що стійка до виходу з ладу окремих складових частин, приладову систему, яка має у своєму складі багато невеликих і малобюджетних напівпровідникових пристроїв, які здійснюють обмін даними через безпроводний вимірювальний канал, не обслуговуються і не вимагають спеціальної установки.

У будь-якому приладі можуть розміщатись різноманітні сенсори широкого кола характеристик навколишнього простору (переміщення, рівень освітлення, показники температури, рівень вологості, тиск і так далі), а також способи для первинного аналізу і збереження отриманих показників. Кількість

предметів в такій системі теоретично виділяється тільки галуззю використання і бюджетом, і завдяки невисокій вартості окремих.

При цьому у зв'язку з обмеженими ресурсами окремих вузлових пристроїв для вирішення багатьох задач необхідна синхронізована робота всіх вузлових пристроїв БСПС для досягнення цілі.

Одною з таких задач є задача локалізації вузлових пристроїв у комп'ютеризованій сенсорній приладовій системі з самоорганізацією, що включає вимірювання відстані між вузловими пристроями, часу поширення сигналу між ними, та кута між сусідами вузлового пристрою. Вона полягає у обчисленні позиції персональних сенсорів без застосовування зовнішніх комунікацій

Задача визначення позиції широко досліджувалась у минулому, адже у багатьох практичних галузях вагома інформація про розстановку предметів чи людей, і для їх рішення було випущено велику кількість технологій. Найвідомішою з них є система Global Positioning System (GPS). Однак підхід GPS не має змогу бути застосований у КССВМВ у зв'язку з його вимогами до наявності великої кількості додаткової інфраструктури (як у випадку з, супутників). Тому постає питання необхідності вдосконалення приладових систем вимірювання відстані, часу прибуття сигналу і кута між об'єктами, дослідження новітніх і поліпшення наявних методів і способів вимірювання з поліпшеною точністю.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Основний зміст дисертації визначають результати досліджень, які велися протягом 2012-2018 років відповідно до тематичних планів і технічного завдання таких науково-дослідних робіт:

№ 32-Д-178 “Розробка теоретичних та експериментальних основ для створення національного еталону малих довжин” (номер держреєстрації 0197U013138), де здобувачеві належать розділи 3 і 4 та підрозділи 2.1 і 2.2, в яких наведено фізичні основи інтерференційних методів вимірювання малих довжин, принципи побудови інтерферометричних вимірювачів малих довжин, а

також шляхи підвищення точності таких вимірювачів (автор брав участь у виконанні роботи в якості виконавця);

№ 32-Д-205 “Розробка методів розрахунку електричних та електро механічних кіл зі змінними параметрами в метрологічних вимірювальних системах контролю механічних і електромагнітних властивостей матеріалів” (номер держреєстрації 0199U003433), де здобувачеві належать розділи 2 і 3 та підрозділи 1.2, 4.2 і 4.3, в яких розроблено структурні та електричні схеми засобів вимірювання і контролю механічних і електромагнітних властивостей матеріалів, а також проведено експериментальні дослідження розроблених засобів вимірювання (автор брав участь у виконанні роботи в якості відповідального виконавця);

№ 32-Д-260 “Розробка основ теорії фазових і частотних методів вимірювання та контролю параметрів радіотехнічних і телекомунікаційних мереж та систем” (номер держреєстрації 0102U002264), де здобувачеві належать розділи 1, 5 і 7 та підрозділи 6.3, 10.1, 10.3, 11.2 і 11.4, в яких розроблено теоретичні основи фазових і частотних радіооптичних методів вимірювання, а також радіотехнічні та оптичні методи і засоби вимірювання частотних характеристик радіотехнічних і телекомунікаційних мереж та систем (автор брав участь у виконанні роботи в якості відповідального виконавця);

“Розробка та дослідження елементів і систем автоматизації та їх моделювання” (номер держреєстрації 0110U000823), де здобувачеві належить підрозділ 4.10, в якому досліджено низькочастотний смуговий фільтр з високою вибірковістю та проведено аналіз зміни його характеристик при розкиді параметрів елементів схеми і зміні температури навколишнього середовища (автор брав участь у виконанні роботи в якості виконавця);

“Розробка та дослідження автоматичних та електротехнічних елементів і систем” (номер держреєстрації 0116U000281), де здобувачеві належить розділ 5, в якому проведено огляд методів вимірювання координат та параметрів руху мобільних об’єктів з використанням супутникових радіонавігаційних систем (автор брав участь у виконанні роботи в якості виконавця);

№ 125-ДБ17 “Методологія побудови сучасних дистанційних інформаційно-вимірювальних систем” (номер держреєстрації 0117U002367), де здобувачеві належать підрозділи 2.2 та 4.2, в яких проведено синтез диференціально-цифрового методу дистанційного вимірювання геометричних параметрів деталей та розроблено перетворювач напруга-значення частоти з імпульсним зворотним зв’язком (автор брав участь у виконанні роботи в якості відповідального виконавця).

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вирішення важливої проблеми розробки наукових основ створення комп’ютеризованої сенсорної приладової системи вимірювання механічних величин за рахунок розробки нових та удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання з покращеними метрологічними характеристиками та алгоритмічною обробкою даних про параметри розташування об’єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі задачі:

1. Провести аналіз існуючих методів і засобів вимірювання відстані, часу проходження сигналу і кута між об’єктами та систематизувати відомі теоретичні підходи, що покладено в основу їх побудови.

2. Розвинути теоретичні засади методів вимірювання відстані, часу проходження сигналу і кута та проаналізувати способи підвищення їх точності.

3. Вивести рівняння похибок приладової системи, проаналізувати складові похибки первинних мікропроцесорних перетворювачів. Розробити модель похибок КССВМВ при визначенні відстані, часу проходження сигналу і кута між об’єктами.

4. Розробити мікропроцесорні первинні перетворювачі та пристрої обробки сигналів сенсорних приладових систем та алгоритми їх роботи.

5. Розробити метод підвищення продуктивності комп’ютеризованих сенсорних вимірювальних систем, з метою підвищення точності при передачі даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах.

6. Розробити безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання показників вимірювання в зонах невпевненого прийому, застосовуючи також фільтр Гауса.

7. Розробити комп'ютеризований лазерний далекомір з сенсорним мережевим інтерфейсом, що поєднує у собі функції лазерного далекоміра, та методи визначення відстані між об'єктами безпроводних сенсорних приладів, що дасть змогу оцінювати відстань на основі двох показників, з метою зменшення похибки, а також, враховуючи використання методу *Angle of Arrival* для визначення кута, буде виконувати функції електронного тахеометра.

8. Провести експериментальні дослідження розроблених вимірювальних перетворювачів та засобів вимірювання для підтвердження адекватності розроблених теоретичних моделей, ефективності запропонованих методів та створених на цій основі комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин.

9. Впровадження результатів досліджень.

**Об'єктом дослідження** є процес вимірювання механічних величин за допомогою його приладової системи, реалізованої на основі розроблених нових та удосконалених існуючих методів і засобів вимірювання.

**Предметом дослідження** є методи і засоби вимірювання відстані, часу прибуття сигналу та кута між об'єктами з покращеними метрологічними характеристиками та алгоритмічною обробкою даних.

**Методи досліджень.** Для досягнення поставленої мети в роботі використовуються такі методи досліджень:

- аналіз теоретичних основ і принципів побудови існуючих методів і засобів вимірювання відстані, часу прибуття сигналу та кутів між об'єктами (розділ 1);

- методи локалізації об'єктів (вимірювання відстані на основі падіння потужності або формула Фрісса, методи вимірювання відстані на основі часу прибуття сигналу *ToA – Time of Arrival* та *Time Difference of Arrival*, а також



метод *Angle of Arrival* для визначення кута отриманого сигналу), методи вимірювання параметрів сигналу первинних перетворювачів (розділ 2);

- методи теорії масового обслуговування, методи математичного моделювання, методи аналізу випадкових похибок первинних перетворювачів, методи ідентифікації зон невпевненого прийому в каналах засобу вимірювання (розділ 3), метод фільтрації сигналів, за допомогою фільтру Гауса;

- методи вимірювання потужності сенсорів та її відхилення від номінального значення, методи вимірювання амплітуди та фази сигналу, а також аналізу їх похибок (розділ 4);

- методи вимірювання відстані, часу прибуття сигналу та кута між об'єктами, методи фізичного та математичного моделювання з широким використанням пакетів прикладних програм та інженерно-обчислювальних комплексів *MATLAB*, *Motorola LAN planer* та *Electronics Workbench* з метою створення віртуальних приладів для перевірки теоретичних рішень (розділ 5, 6).

**Наукова новизна отриманих результатів.** Найбільш суттєві результати отримані автором особисто і визначаються такими положеннями:

- вперше сформульовані нові принципи побудови приладових систем із включенням безпроводних сенсорних пристроїв для вимірювання механічних величин, що базуються на отриманні альтернативних показників вимірювання, завдяки функції локалізації сенсорів у складі комп'ютеризованої приладової системи;

- вперше розроблені нові підходи для вирішення проблеми визначення принципу дії мікропроцесорних первинних вимірювальних перетворювачів, що включені до складу безпроводних сенсорних пристроїв, для створення комп'ютеризованих приладових систем на їх основі та складені рівняння оцінки їх похибок;

- вдосконалено модель визначення відстані на основі часу прибуття сигналу, що дає змогу оцінювати відстань по передньому фронту імпульсу та оцінити похибку з врахуванням перешкод;

- вдосконалено комп'ютеризований лазерний далекомір, до складу якого включено безпроводний сенсорний інтерфейс, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох альтернативних показників;

- вперше розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем, з метою підвищення точності при передачі даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах (захищено патентами України на корисну модель № 60400 і № 69626);

- дістала подальший розвиток методика локалізації безпроводних сенсорів, що дає змогу оцінити відстань між сенсорного пристрою БСПСми, час проходження сигналу між ними, та кут, що в поєднанні з лазерними далекомірами утворює тахеометричну сенсорну приладову систему;

- дістала подальший розвиток методика визначення відстані між об'єктами в умовах відсутності прямої видимості, що відрізняється від існуючих методів далекометрії тим, що світловий випромінювання, який в них застосовується, не здатний розповсюджуватись по криволінійним траєкторіям.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в наступному:

- розроблено математичну модель для дослідження процесу вимірювання відстані в БСПС у поєднанні з блоками лазерного далекоміра. Вхідними параметрами з боку сенсорної БСПС є потужності відправленого та прийнятого сигналу, а з боку лазерного далекоміра – швидкість світла у вакуумі, показник переломлення середовища та час проходження променя до цілі і назад. Вихідними параметрами, в обох випадках, є відстань між об'єктами, що отримана двома різними методами. Це дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю, шляхом співставлення вихідних параметрів, а саме похибка  $\delta \approx 0,2\%$ , що є допустимим для ділянки 250x250 м;

- модернізовано структурну схему сенсорного безпроводного пристрою, шляхом включення в її склад блоків лазерного далекоміра. Що дає можливість отримати альтернативне значення відстані між об'єктами. Це дало змогу, при

сталих перешкодах, знизити похибку вимірювання у 2,5 рази, застосовуючи для співставлення дані сенсорної БСПС та лазерного далекоміра;

- розроблено математичну модель визначання відстані між сенсорними прийомопередавальний пристроями, на основі часу прибуття сигналу, а також проведено оцінку похибки визначення часу прибуття сигналу по передньому фронту імпульсу, а також визначено основні параметри, що на неї впливають;

- розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем, що у порівнянні з існуючими дозволяє збільшити дальність вимірювань до 15 – 17 м, при цьому показники похибки зберігаються в межах  $\delta \approx 0,2\%$ , при загальній дальності 160 м;

- розроблено маршрутний сенсорний прилад, що здатний перерозподіляти вимірювальні сигнали, з метою уникнення помилок при обробці даних вимірювання механічних величин в комп'ютеризованій сенсорній приладовій системі;

- модернізовано сенсорний вимірювальний пристрій, ввівши до їх складу мікропроцесорні первинні перетворювачі, що дозволяє більш точно аналізувати похибку вимірювань.

Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємстві ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» та у навчальний процес в Національному авіаційному університеті (м. Київ) при викладанні дисциплін “Фізичні основи сучасної метрології” і “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка”.

Наукову новизну та практичне значення результатів роботи підтверджено двома патентами України №60400 та №69626.

### **Особистий внесок здобувача**

Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в роботі використані ті результати, що є результатом особистої праці здобувача. Достовірність та обґрунтованість результатів дисертаційної роботи

підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків, експериментально та моделюванням на ЕОМ.

Особистий внесок здобувача у праці, опубліковані у співавторстві, зі списку публікацій за темою дисертації (додаток X): [1] – розділи 3 та 4 підготовлені здобувачем, а розділи 1 і 2 – спільно авторами; [2] – здобувачем проведено аналіз безпроводного сенсорного приладу; [3] – запропоновано шляхи підвищення безпеки передачі даних вимірювання в безпроводній сенсорній приладовій системі; [4] – здобувачем запропоновано шляхи підвищення безпеки передачі даних вимірювання в безпроводній сенсорній приладовій системі; [7] – здобувачем запропонована модель прогнозування похибки в комп'ютеризованих вимірювальних приладових системах; [8] – здобувачем проаналізовані безпроводні сенсорні пристрої, як засоби вимірювання відстані; [11] – здобувачем запропонована модель локалізації безпроводних сенсорних пристроїв; [12] – здобувачем запропонована структурна схема сенсорного приладу вимірювання відстані; [15] – здобувачем запропонована модель оцінки похибки вимірювання відстані з урахуванням перешкод; [16] – здобувачем розроблена модель безпроводної приладової системи локалізації об'єктів; [20] – здобувачем запропонована методика оцінки впливу високих температур на похибку вимірювання відстані; [21] – здобувачем розроблено модель сенсорного вимірювального приладу; [23] – здобувачем запропонований метод вимірювання відстані; [24] – здобувачем запропонований принцип дії системи визначення пересування; [25] – здобувачем проведений аналіз застосування безпроводних сенсорних приладових систем вимірювання механічних величин у військовій сфері; [26] – здобувачем запропоновано модель приладової системи, для реалізації вимірювань, що потрібні для повноцінного функціонування системи "розумний будинок"; [28] – здобувачем запропоновано застосування блоку аналізу стану якості сигналу у безпроводному сенсорному вимірювальному пристрої; [29] – здобувачем запропоновано алгоритм перерозподілу у вузловому безпроводному сенсорному вимірювальному пристрої; [30] – здобувачем побудовано метод

підвищення якості у безпроводних сенсорних вимірювальних приладових системах; [31] – здобувачем проведено аналіз сенсорних безпроводних вимірювальних приладів; [34] – здобувачем запропонована модель прогнозування похибки в комп'ютеризованих вимірювальних приладових системах; [35] – здобувачем запропонована методика використання датчиків руху у сенсорних безпроводних комп'ютеризованих приладових системах; [38] – здобувачем складено опис моделі взаємодії сенсорних приладів в комп'ютеризованій системі вимірювання механічних величин; [44] – здобувачем запропоновано принцип дії сенсорного мережевого приладу; [48] – здобувачем розроблені рекомендації, що до застосування приладових систем вимірювання механічних величин в технології "Інтернет речей"; [49] – здобувачем запропонована модель збору та аналізу показників вимірювання механічних величин; [57] – здобувачем розроблений алгоритм шифрування даних вимірювання, що дозволяє знизити імовірність помилок при їх аналізі; [58] – здобувачем запропонований метод підвищення завадостійкості безпроводних вимірювальних сенсорних приладів; [60] – здобувачем проведено аналіз методів вимірювання механічних величин, що використовуються в технології "розумний дім".

### **Апробація результатів дисертації**

Викладені у дисертаційній роботі результати досліджень доповідалися, обговорювалися та одержали схвалення на таких наукових конференціях і семінарах: 3<sup>я</sup> міжнародна НПК "Управління, автоматизація та навколишнє середовище" (м. Севастополь 2012 р.); 5<sup>я</sup> міжнародна НПК "Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії" (м. Переяслав-Хмельницький 2014 р.); міжнародна НПК "Метрологія і інформаційно-вимірювальна техніка" (м. Київ 2017 р.); міжнародна НПК 17<sup>я</sup> "Машинобудування очима молодих: Прогресивні ідеї – наука – Виробництво" (м. Чернігів 2017 р.); НПК "Актуальні проблеми інформаційних технологій" (м. Київ 2017 р.); НПК "Удосконалення та модернізація озброєння, військової та

спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні Збройних Сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель" (м. Київ 2017 р.); 8<sup>а</sup> міжнародна НПК "Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації" (м. Кам'янець-Подільський 2018 р.); 10<sup>а</sup>, 11<sup>а</sup> міжнародна НПК «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (м. Київ 2017 р., 2018 р.); 31<sup>а</sup>, 32<sup>а</sup> міжнародна НПК "Актуальні проблеми сучасної науки" (м. Москва–Астана–Харків–Відень, м. Санкт-Петербург–Астана–Київ–Відень 2018 р.); міжнародна НПК "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання" (м. Івано-Франківськ 2018р.); 8<sup>а</sup> міжнародна НПК «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернівці 2018 р.); 9<sup>а</sup> Всеукраїнська НПК "Технічне регулювання, метрологія та якість: виклики сучасності" (м. Одеса 2018 р.); 3<sup>а</sup> міжнародна НПК "Інноваційний розвиток науки нового тисячоліття" (м. Чернівці 2018 р.); 3<sup>а</sup> міжнародна НПК "Теорія і практика сучасної науки" (м. Київ 2018 р.) 3<sup>а</sup> міжнародна НПК "Сучасні тенденції розвитку науки" (м. Львів 2018 р.); 11<sup>а</sup> міжнародна НПК "Метрологія та вимірювальна техніка" (м. Харків 2018 р.). Також результати дисертаційної роботи доповідались на наукових семінарах кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету та науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів кафедри мережевих та інтернет технологій Київського Національного університету імені Тараса Шевченка.

### **Публікації**

За результатами досліджень опубліковано 60 наукових праць, у тому числі 2 монографії, 25 статей у наукових фахових виданнях (з них 9 статей у виданнях іноземних держав, 9 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 патенти на корисну модель, 17 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 14 статей у інших виданнях.

### **Структура та загальний обсяг дисертації**

Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 279 сторінок. Основний зміст викладено на 251 сторінці, який містить 113 рисунків та 5 таблиць. Список використаних джерел по розділах становить: розділ 1 – 51 джерело, розділ 2 – 37 джерел, розділ 3 – 51 джерело, розділ 4 – 48 джерел, розділ 5 – 30 джерел.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ В ГАЛУЗІ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ**

На сьогоднішній день в літературі відомі описи різних методів вимірювання механічних величин, а також БСПС, які також здатні вимірювати відстань, час проходження сигналу та кут між вузловими пристроями. Також комп'ютеризовані системи, до складу яких входять сенсорні приладові системи, здатні аналізувати результати вимірювань та проводити оцінку похибок. Та комплексного огляду даних технологій, як компонентів комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин, в літературних джерелах не міститься.

Тому задачею даного розділу є: аналіз відомих засобів вимірювання механічних величин; аналіз розвитку БСПС, як засобів вимірювання механічних величин, а також постановка задач для наступних розділів, на основі розглянутих технологій.

За результатами досліджень, проведених у даному розділі, автором опубліковані роботи [1, 13, 17, 34, 39-41, 44].

### **1.1. Загальний аналіз методів приладів вимірювання відстані**

Відстань до об'єкта вимірюється за часом затримки, тобто часом випромінювання сигналу й часом реєстрації відбитого сигналу. Радіохвилі розповсюджуються в просторі зі швидкістю світла, тому час затримки для відстані у кілька сотень кілометрів становить тисячні долі секунди [50].

*Імпульсний метод (ІМ).* Для його реалізації незатухаючі коливання несучої частоти піддаються в передавальній пристрійі амплітудно-імпульсної модуляції. Перевага даного методу є і в тому, що при порівняно простій апаратурі, дозволяє одночасно вимірювати дальність багатьох об'єктів. До недоліків методу відносяться неможливість вимірювання малих дальностей. Даний метод не забезпечує вимірювання радіальної швидкості цілі [50].

*Частотний метод.* Визначення дальності до об'єкта при використанні частотної модуляції (ЧМ) засновано на вимірі збільшення частоти



передавальний пристрою за час поширення сигналу до цілі і назад. Значення частоти передавальний пристрою має змогу змінюватися за лінійним законом. В результаті змішування цих коливань утворюються биття, її спектр складається з однієї спектральної лінії [50].

Недоліками методу вимірювача дальності є: складність апаратури при вимірюванні дальності багатьох об'єктів, трудність ефективної розв'язки приймального і передавального трактів, високі вимоги до лінійності зміни частоти випромінюваних коливань при вимірюванні дальності і багатьох об'єктів [50].

Переваги методу – це мала пікова потужність випромінюваного сигналу при високій точності вимірювання дальності і можливість вимірювання дуже малих дальностей [50].

*Фазовий метод (ФМ).* При фазовому методі застосовуються безперервні сигнали (не обов'язково монохроматичні). Вимір часу запізнювання проводиться шляхом вимірювання різниці фаз між модулюючим коливаннями масштабної частоти, які виділяються з випромінюваного і прийнятого сигналів. Різниця фаз між цими коливаннями має зв'язок з часом запізнювання рівністю [50]

$$\varphi = \omega_M \tau = \frac{w_M 2R}{c}$$

Основна перевага методу полягає в тому, що вибором масштабної частоти має змогу бути забезпечена дуже висока точність вимірювань. Недоліками є: неможливість одночасного вимірювання дальності кількох об'єктів, що знаходяться в зоні опромінення вимірювача дальності, необхідність придушення випромінюваного сигналу, який надходить на вхід приймаючий пристрою, складність технічної реалізації, яка обумовлена необхідністю використання декількох шкал [50].

Електронні тахеометри (ЕТ) стали важливим засобом науково-технічного прогресу і все ширше застосовуються в інженерній геодезії, будівництві, геодезичній метрології тощо [49].

Провідні фірми-виробники електронних тахеометрів (Trimble, Leica, Topcon, Sokkia, South) випускають моделі тахеометрів, які не тільки дають можливість вимірювати відстані на призмовий та плівковий рефлектори, але й працюють у режимі без відбивача, що, своєю чергою, дуже зручно під час практичного виконання різноманітних інженерних робіт [1, 49].

Появі електронних тахеометрів передувало створення та удосконалення електронних теодолітів і топографічних лазерних далекомірів. Електронний тахеометр (ЕТ) – це вимірювальний прилад, у якому конструктивно об'єднані електронний теодоліт, лазерний далекомір і мікропроцесор із прикладним геодезичним, програмним забезпеченням [49].

Мікропроцесор дає змогу зберігати дані вимірів у внутрішній пам'яті і здійснювати обробку й аналіз результатів вимірів безпосередньо в полі [1, 4, 49].

Для вибору потрібного електронного тахеометра необхідно детально розібратися у можливостях приладу. Перевагу надають точності кутових та лінійних вимірів. За цим показником доцільно встановити наступну класифікацію [49]:

- Прицезійні – це такі електронні тахеометри точність вимірювання кутів яких становить  $\leq 1''$ , ліній  $\leq 1\text{мм}$ . Їх використовують для високоточних інженерно – геодезичних робіт [49].

Крім цього, їх можна застосовувати в метрології, як у випадку з, для перевірки ліній взірцевих геодезичних базисів з метою контролю їх стабільності. Еталоном у цьому класі є прилад фірми Trimble 5601 DR Standart, що має точність кутових вимірів  $0,5''$ , а лінійних  $0.3\text{мм}$  до  $1\text{км}$ . Таким приладом користується Укрметртестстандарт [49].

- Точні – це електронні тахеометри точність кутових вимірювання яких коливається в межах від  $1''$  -  $5''$ , а лінійних  $4\text{мм}$  на  $1\text{ км}$ . Такі прилади доцільно використовувати для різноманітних топографо–геодезичних робіт, для створення БСПС полігонометрії, землевпорядних та кадастрових робіт. Такими

електронними тахеометрами є, як у випадку з, прилад NPL 632 фірми Nikon , SET X1 фірми Sokkia та інші [49].

- Рутинні – це прилади, точність кутових вимірювань має змогу досягати 10", а лінійних 5мм. І більше на км. Ці електронні тахеометри використовують для створення знімальної основи, а також застосовувати для виконання електронних тахеометричних зйомок різних масштабів. До них можна віднести модель Focus 4 фірми Spectra Precision, 326X фірми Pentax, тощо [49].

- Безрефлекторні – це прилади, що працюють без відбивача. На сьогоднішній день, ця функція постійно розвивається, а прилади цього класу здатні працювати без застосування відбивача на великих відстанях; такі як Leica FlexLine до 1000 м., а Topcon IS – 1 до 2000м [49].

- Універсальні – спеціальний клас електронних тахеометрів, як у випадку з, з інтегрованим GPS – приймаючий пристроєм [49].

Точність кутових і лінійних вимірювань висока. Перша такі прилади почала випускати компанія Leica Geosystem моделі SmartStation 1201+, забезпечує високу точність вимірювання кутів 1", ліній 1+1.5ppm [49].

Однією з основних переваг SmartStation є можливість виконувати геодезичні роботи за відсутності розвиненої опорної БСПС [49].

Ці прилади доцільно використовувати для визначення меж ділянок, які розташовані на значній віддалі від пунктів опорної БСПС, а також для розмічувальних робіт на будівельних майданчиках, де видимість перекривається будівлями, обладнанням та технікою [49].

Реально ET TPS1200 та TPS 1200+ зі встановленим на ньому інтегрованим GPS – приймаючий пристроєм має змогу працювати на відстані до 50км. від базової станції [49].

Крім того прилад можна розмістити в будь – якому зручному місці, не потрібно прокладати опорних ходів, координати точки стояння визначаються за допомогою RTK (кінематика в реальному часі) з точністю 10мм + 1рмм, а уні-

кальна вбудована система моніторингу цілісності даних відразу дозволяє перевіряти всі отримані результати вимірювання [49].

В даному електронному тахеометрі закладена програма автоматичного пошуку та наведення на візирну ціль(призму), що разом із дистанційним управлінням, яке здійснюється через радіомодем, дозволяє прискорити виконання роботи і зменшити кількість виконавців (оператор з відбивачем має змогу виконувати зйомку сам, без сторонньої допомоги) [49].

В залежності від поставлених задач систему Leica SmartStation можна використовувати окремо, як електронний тахеометр так і GPS - станцію. (рис.1.1) [3, 49].

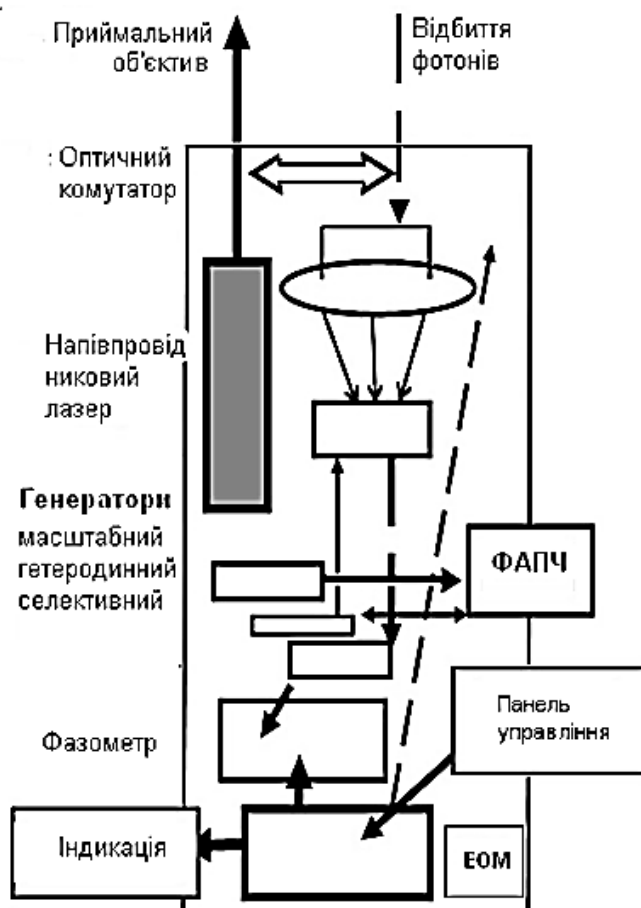


Рисунок 1.1. – Деякі моделі сучасних електронних тахеометрів [5, 22, 49]

Лазери і засновані на них лазерні технології знайшли широке застосування в різних галузях науки. Застосування лазерної техніки в геодезії стало останнім кроком на шляху проникнення лазерів в будівництво [51].

Сьогодні застосування лазерних приладів при проведенні всіляких вимірювань і визначення положення будівельних елементів є нормою. Точність лазерів і їх функціональні властивості сильно полегшили трудомісткі операції. Лазерні прилади складають серйозну конкуренцію традиційним вимірювальним приладам і устаткуванню – нівелірам, рулеткам, рівням [49, 51].

*Умови вимірювань.* Максимальне відхилення точності вимірювання можливе за несприятливих умов навколишнього середовища, таких як яскраве сонячне світло або вимірювання до дуже нерівних поверхонь і до поверхонь з дуже низькою відбивною здатністю. Для відстаней понад 30 м максимальне відхилення результату вимірювання має змогу зрости до  $\pm 10$  мм [51].



а – загальна будова;

б – дісплей і пульт управління

Рисунок 1.2. – Лазерний далекомір Distro [6, 51]

*Дальність вимірювання.* Вночі, у сутінках, або якщо об'єкт, до якого виконується вимірювання затінений, дальність вимірювання без візирної пластини має змогу бути збільшена. Застосовують візирну пластину для збільшення дальності вимірювання протягом світлового дня, або якщо об'єкт, до якого виконується вимірювання, має погану відбивну поверхню [51].

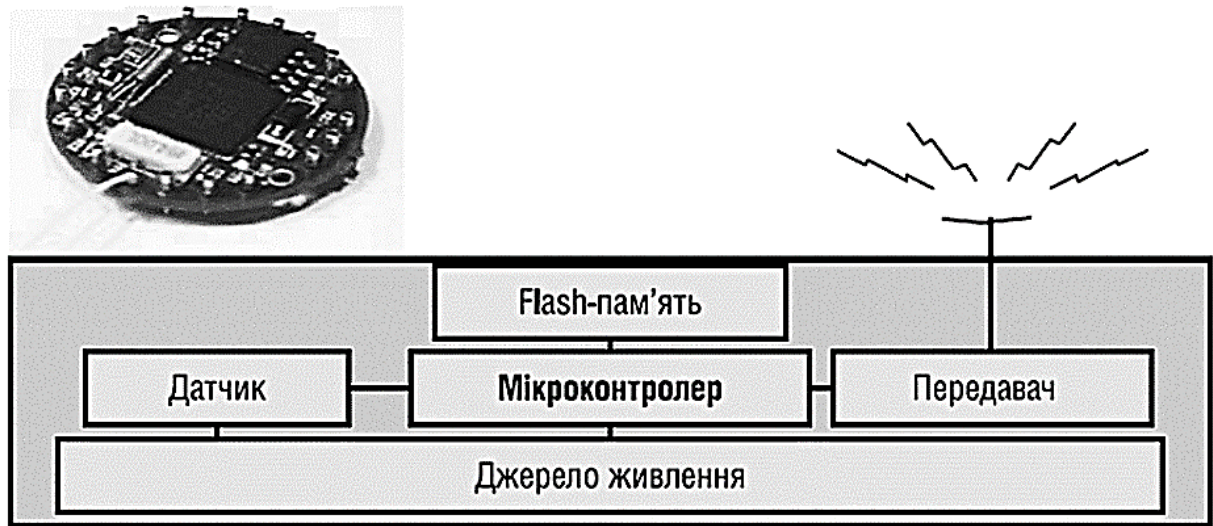
*Поверхні, до яких виконується вимірювання.* Можливі похибки, якщо вимірювання виконується до безбарвних прозорих поверхонь (як у випадку з, поверхні води), незапорошеного скла та до глясових поверхонь [7]. Час вимірювання до дуже темних поверхонь та до поверхонь з поганою відбивною здатністю має змогу збільшуватися [51].

На сьогоднішній день у всьому світі усе більш пильну увагу привертають до себе "безпроводні сенсорні приладові системи" ("Sensor devises", далі сенсорні приладові системи) [8, 13, 14, 46].

Поняття "Сенсорна приладова система" з'явилося порівняно недавно (кілька років тому) але на сьогоднішній день є вже повністю сталим терміном (Sensor devises), що означає розподілену, таку, що самоорганізовується, стійку до відмови окремих елементів БСПС, що складається з великого числа малогабаритних і дешевих напівпровідникових приладів, що обмінюються інформацією по безпроводному каналу зв'язку, не обслуговуються і не вимагають спеціальної установки [13, 34, 46].

Кожен пристрій має змогу містити різні датчики фізичних параметрів середовища (рух, світло, температура, вологість, тиск і так далі), а також засоби для первинної обробки і зберігання отриманих даних [34, 46].

Кількість об'єктів в такій м системі теоретично визначається лише сферою застосування і бюджетом, і завдяки низькій ціні окремих пристроїв (порядку декілька доларів і нижче) має змогу бути дуже велике (порядку декілька тисяч і вище) [13, 34, 46].



**Архітектура мікроконтролера розрядністю 8 біт:**

- Оперативна пам'ять програм – 128 KB;
- Оперативна пам'ять даних RAM – 64 KB;
- Flash-пам'ять – 1 MB;
- Частотний діапазон:
  - $F=315\text{--}916$  МГц для Mica 2, Mica2Dot;
  - $F=2,4$  ГГц для ZigBee IEEE 802.15.4, Imote

**Приклад CPU: Intel StrongARM**

- швидкість передавання:
  - $DR=38$  кбіт/с–0,7 Мбіт/с;
- відстань:  $D=30\text{--}150$  м;
- живлення: максимум 1000 мВт;
- потужність передавання:  $PTx=4\text{--}10$  дБм;
- короткі повідомлення:  $TL=100$  біт/1 мс;
- Операційна система: Tiny OS

Рисунок 1.3. – Модель і параметри сенсорного пристрою БСПС [13, 16, 20]

Однією з актуальних задач є визначення місця розташування окремих об'єктів БСПС. Неодмінною умовою при експлуатації будь-яких систем моніторингу та контролю є прив'язка даних, зібраних всією системою до географічних координат для відображення зібраної інформації на карті і подальшого аналізу [13, 34, 46].

Крім того, така система (на відміну від традиційних радіосистем) за наявності вбудованої підсистеми визначення позиції окремих об'єктів має змогу бути розгорнута практично де завгодно з мінімальними витратами. Це має змогу бути зроблено, як у випадку з, шляхом розкидання об'єктів БСПС з літака [13, 18, 46].

## 1.2. Лазерні далекоміри

*Про лазерні і радіодалекоміри.* У лазерних далекомірів та радіодалекомірів довжина хвилі модуляції має змогу лежати в діапазоні від 0,6 м до 20 м, що відповідає частоті  $F$  від 500 МГц до 15 МГц [47,48].

Чим більше  $F$ , тим точніше далекомір [12]. Несуча ж значення частоти  $f$  набагато вище, ніж  $F$ , і, відповідно, довжина хвилі несучої  $\nu/f$  набагато менше довжину хвилі модуляції  $\nu/F$  [47, 48].

Несуча хвиля більшості радіодалекомірів складає 3см ( $f=10000\text{МГц}=10^{10}\text{Гц}$ ), а в лазерних далекомірів довжина хвилі несучої - це довжина хвилі світла, яка, як у випадку з, при використанні гелій-неонового (*He-Ne*) лазера дорівнює 0,63 мкм. Це червоне світло з частотою  $f \approx 5 \cdot 10^{14}$  Гц [13, 47, 48].

Таким чином, з принципової точки зору лазерні далекоміри і радіодалекомірів відрізняються лише довжиною хвилі несучих коливань - в радіодалекомірах вона на 4-5 порядків більше, ніж в лазерних далекомірів [47,48].

Але така відмінність всього лише в одному параметрі приводить до різкої відмінності цих приладів в схемних і конструктивних відношеннях, оскільки для оптичних хвиль і радіохвиль застосовуються абсолютно різні методи передачі, модуляції і прийому [47, 48].

В даний час геодезичні радіодалекоміри не випускаються і представляють лише історичний інтерес [47, 48].

Фазові лазерні далекоміри. На рис.1.4. показана узагальнена блок-схема фазового лазерного далекоміра. Випромінюване джерелом світло пропускається через модулюючий пристрій, керований генеруючий пристроєм модулюючої частоти  $F$  [47, 48].

Як модулюючий пристрій останнім часом частіше за все застосовується електрооптичний модулюючий пристрій Поккельса, робота якого заснована на лінійному електрооптичному ефекті (ефекті Поккельса) [14, 47, 48].



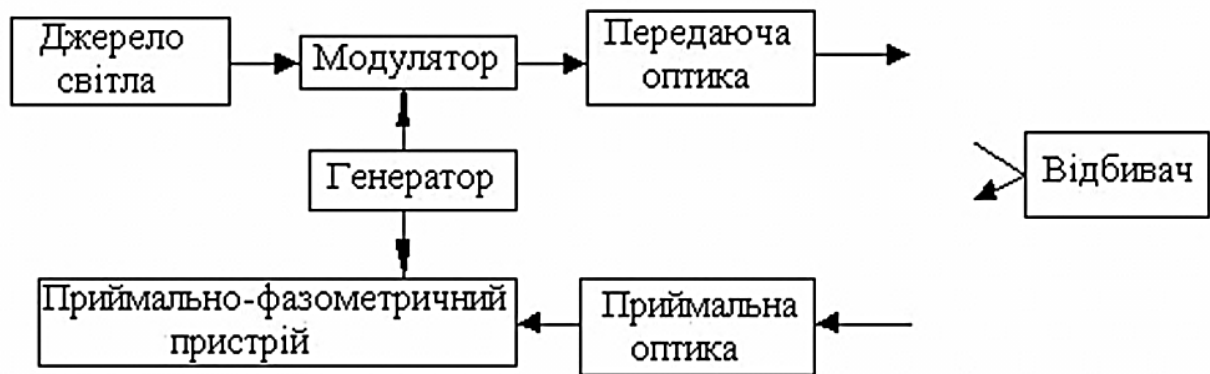


Рисунок 1.4. – Узагальнена блок-схема фазового лазерного далекоміра

Теорія ефекту має зв'язок з кристалооптикою і досить складна; тут слід відзначити лише, що модулюючий пристрій є кристалом у формі паралелепіпеда, до верхньої і нижньої граней якого прикладена напруга від генеруючого пристрою [47, 48].

Поляризоване світло, що входить в торець кристала лінійно перетворюється на виході з кристала у світло з еліптичною поляризацією, у якого вид еліпса під дією змінної модулюючої напруги від генеруючого пристрою періодично змінюється (див. рис 1.5) з частотою  $F$ , тобто світло модулюється за поляризацією [47, 48].

Таку поляризаційну модуляцію потім перетворюють в амплітудну, тобто модуляцію світла по інтенсивності, поставивши на шляху світлового пучка поляризатор (який в цьому випадку називають аналізатором), вісь пропускання якого перпендикулярна напрямку поляризації, що входить в кристал випромінювання [15, 47, 48].

Таблиця 1.1

Залежність вигляду еліпса від різниці фаз

$\varphi_0$	0	45	90	135	180	225	270	335	360
поляризація									

За допомогою передаючої оптичної системи модульоване світло прямує на відбивач, встановлений в кінцевій точці лінії, що вимірюється. Як відбивач звичайно використовуються кутові призми (одна або декілька в єдиному блоці), які володіють тією чудовою властивістю, що світло відображається в тому ж напрямі навіть при розвороті призми до  $30^\circ$ . Частина відображеного світла поступає в приймальну оптичну систему і прямує на приймально-фазометричний пристрій, основними компонентами якого є фотоприймаючий пристрій (приймаючий пристрій світла) і первинний перетворювач на основі фази сигналу [47, 48].

Як фотоприймаючий пристрій використовується фотодіод або фотоелектронний помножувач (ФЕП), перетворюючий світло в електричний сигнал, який поступає на один вхід первинного перетворювача лінійно-кутових величин на основі фази сигналу первинного перетворювача на основі фази сигналу. На другий вхід первинного перетворювача на основі фази сигналу подається сигнал від генеруючого пристрою масштабної частоти, який слугує опорним сигналом. первинного перетворювача на основі фази сигналу і вимірює різницю фаз між опорним сигналом і тим, що прийшов з дистанції. В сучасних лазерних далекомірах використовується *цифровий* первинний перетворювача на основі фази сигналу, принцип роботи якого буде розглянуто у пункті 2.2.2., де його буде запропоновано включити до складу безпроводного сенсорному пристрою БСПС [17, 47, 48].

Ідея цифрових (дискретних) фазових вимірювань полягає в тому, що шукана різниця фаз перетвориться у відповідний інтервал часу, який потім вимірюється шляхом підрахунку числа імпульсів (з відомим періодом повторення) за цей інтервал [47, 48].

По суті справи, тут використовується той же принцип, що і в часовому (імпульсному) методі віддалеметрії (див. рис.1.5), але з деякими істотними відмінностями [16, 47,48].



Рисунок 1.5. – Принцип побудови вимірювача часових інтервалів

По-перше, опорний сигнал і сигнал з дистанції синусоїдальні, і з них формуються прямокутні імпульси; електронний ключ відкривається переднім фронтом імпульсу опорного сигналу і закривається переднім фронтом імпульсу дистанційного сигналу [47, 48].

По-друге, оскільки різниця фаз двох синусоїдальних сигналів має змогу бути знайдена тільки в межах від 0 до  $2\pi$  (величина  $\Delta\varphi$  у формулі (1.1)) [47, 48],

$$\varphi = 2\pi N + \Delta\varphi \quad (1.1)$$

інтервал часу між старт - і стоп-імпульсом дорівнює не повному часу розповсюдження  $\tau$ , а дробової частини  $\Delta\tau$  періоду коливачь тієї частоти, на якій працює первинний перетворювач на основі фази сигналу. Іншими словами, електронний ключ виявляється відкритим на якийсь час  $\Delta\tau$ , має зв'язок з вимірюваною різницею фаз  $\Delta\varphi$ , співвідношенням [47, 48].

$$\Delta\varphi = 2\pi F_\phi \Delta\tau,$$

де  $F_\phi$  – значення частоти сигналів, що поступають на первинний перетворювач на основі фази сигналу. Ця значення частоти звичайно набагато нижче за частоту модуляції  $F$ , що виробляється генеруючий пристрійом масштабних частот, і утворюється в результаті гетеродинування, для чого в схему вводиться гетеродин (див. рис.1.6, де низька значення частоти позначена через  $\Delta f$ ) [17, 47, 48].

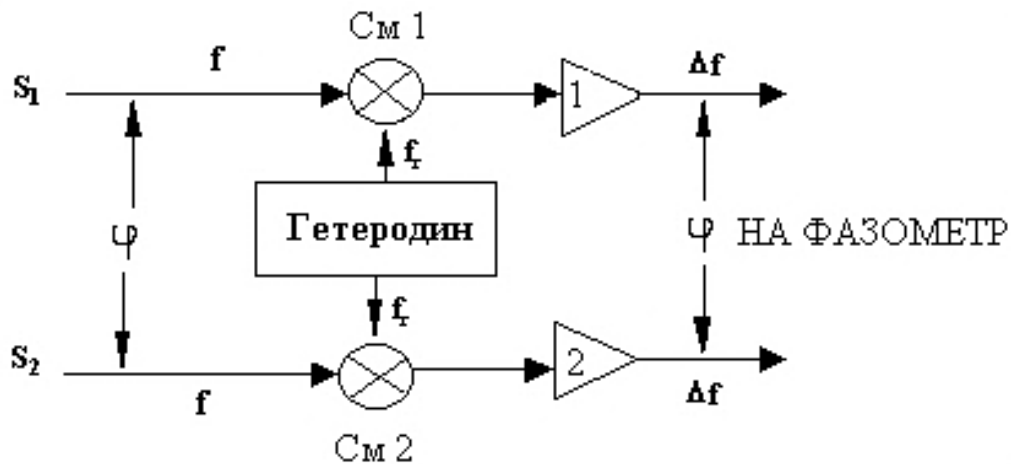


Рисунок 1.6. – Гетеродинна схема вимірювання різниці фаз

Таку схему називають *гетеродинною схемою*. Де в змішувачах См1 і См 2 (рис.1.7) і направивши вихідні сигнали змішувачів в підсилювачі низької частоти 1 і 2, отримаємо на виходах підсилювачів коливання різницевої частоти  $/f - f_2 / = \Delta f$  вигляду [47, 48]

$$s_1 = C_1 \cos [(2\pi \Delta f t + (\varphi_1 - \varphi_2))] \quad (1.2)$$

$$s_2 = C_2 \cos [(2\pi \Delta f t + (\varphi_2 - \varphi_2))]. \quad (1.3)$$

Різниця фаз цих коливань

$$(\varphi_2 - \varphi_2) - (\varphi_1 - \varphi_2) = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi \quad (1.4)$$

Принцип її побудови показаний на рис.1.7 [18, 47, 48].

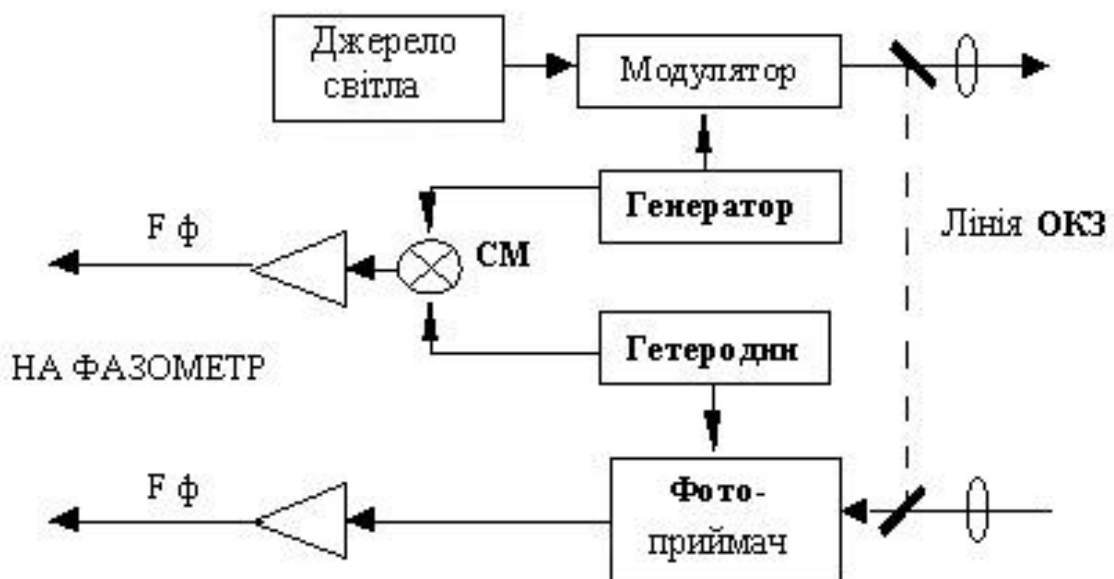


Рисунок 1.7. – Принцип побудови гетеродинної схеми лазерного далекоміра

В опорному каналі частоти генеруючого пристрою і гетеродина змішуються в радіотехнічному змішувачі  $См$ , а в сигнальному каналі функцію змішувача виконує фотоприймаючий пристрій, на який поступає значення частоти від гетеродина і світло, модульоване з частотою генеруючого пристрою. Нагадаємо, що при гетеродинуванні фазові співвідношення не змінюються, і тому значення  $\Delta\varphi$  на низькій різнищевій частоті  $F_\phi$  залишається таким же, як і на частоті модуляції  $F$ . Щоб результат вимірювань був одержаний у вигляді відстані, значення частоти рахункових імпульсів, як і при часовому методі, вибирається чисельно рівній половині швидкості світла за певних умов (з подальшим введенням поправки на реальні умови вимірювань). З метою забезпечити десяткової системи відліку значення частоти рахункових імпульсів  $f_{сч}$  має бути має зв'язок з частотою  $F_\phi$ , що поступають на первинний перетворювач на основі фази сигналів співвідношенням [47, 48]

$$f_{сч} = 10^k F_\phi, \quad (1.5)$$

де  $k$  – ціле число. Звичайно  $k = 3$ , що забезпечує точність результату до 0,001 від масштабної одиниці довжини, тобто від половини довжини хвилі модуляції. При типовій частоті модуляції близько 15 МГц ( $\lambda/2 = 10$  м) це дає 1 см. Для підвищення точності проводиться не однократне, а багатократне вимірювання різниці фаз (як у випадку з, 1000 окремих вимірювань, які настають один за одним протягом приблизно 10с), і результати вимірювань усереднюються. Усереднений по багатьох вимірюваннях результат видається на електронне цифрове табло на один розряд точніше, тобто остаточна точність виходить 0,0001 від  $\lambda/2$  (в приведеному вище прикладі – 1 мм) [47, 48].

Через нестабільність електронних компонентів зсув по фазі сигналів за час вимірювань має змогу змінюватися на значну величину. Вплив цього фазового дрейфу має змогу компенсуватися введенням в схему лінії «оптичного короткого замикання» (ОКЗ), показаної на рис.3.6 пунктиром. По лінії оптичного короткого замикання світло прямує відразу на приймаючий пристрій, минувши дистанцію [47, 48]..

Лінія оптичного короткого замикання є свого роду «внутрішньою дистанцією», вбудованою в прилад, і тому має змогу бути зміряна таким же чином, як і «зовнішня дистанція». В приладі передбачена можливість перемикання світла на відбивач і на лінію оптичного короткого замикання. Оскільки вимірювання «зовнішньої і «внутрішньої» дистанцій» проводиться однією і тією ж апаратурою, різниця вимірювань на відбивач і на лінію оптичного короткого замикання буде вільною від впливу фазового дрейфу за умови, що ці вимірювання слідує достатньо швидко один за одним. В сучасних автоматизованих приладах швидке чергування вимірювань часто здійснюється за допомогою того, що обертається обтюратор – заслінка з отвором, що відкриває шлях світлу поперемінно на відбивач і на лінію оптичного короткого замикання [47, 48].

Як джерело випромінювання застосовується, за рідкісним виключенням, або газовий лазерний випромінювач на суміші гелій-Неон (*He-Ne*), випромінюючий у видимій галузі спектру (червоне світло з довжиною хвилі 0,63 мкм), або напівпровідниковий лазерний випромінювач (а раніше – і світлодіод) на арсеніді галію (*GaAs*), випромінюючий в ближній інфрачервоній галузі (довжина хвилі лежить в діапазоні 0,8 – 1,2 мкм). При використуванні напівпровідникових випромінювачів не вимагається зовнішнього модулюючий пристрою (здійснюється внутрішня модуляція) [47, 48].

Чим більше значення частоти модуляції світла, тим вище точність далекоміра. Тому в прецизійних лазерних далекомірах модуляція здійснюється на НВЧ (надвисоких значення частот) – значення частот більше 300 МГц. В далекомірах щонайвищої точності застосовується *He-Ne* лазерний випромінювач і зовнішній модулюючий пристрій, але головне полягає в тому, що використовується інший тип схеми, в якій світло, перш ніж потрапити на фотоприймаючий пристрій, проходить через демодулюючий пристрій – пристрій, аналогічний модулюючий пристрою, і фазові вимірювання проводяться на високій частоті модуляції (без гетеродинування). На модулюючий пристрій і демодулюючий пристрій подається один і той же

сигнал від генеруючого пристрою, і така схема називається схемою з синхронною демодуляцією. При цьому найдосконалішим варіантом є така, коли модуляція і демодуляція здійснюється в одному і тому ж пристрої, що служить модулюючий пристрійом при роі і демодулюючий пристрійом при прийомі (модем – модулюючий пристрій-демодулюючий пристрій) [47, 48].

Така модифікація ілюструється на рис.1.9. Світло від лазера проходить через напівпрозоре дзеркало ПЗ, модулюється і прямує на дистанцію [47, 48].

Світло, що повернулось від відбивача проходить через ту ж оптичну систему, модем, і, частково відобразившись від напівпрозорого дзеркала, поступає в приймально-індикаторну частину далекоміра. В теорії показується, що середнє за період модуляції значення інтенсивності світла, що двічі пройшло через модем (туди і назад) і що поступає на приймаючий пристрій, стає рівним нулю, якщо підлягаючий вимірюванню зсув по фазі  $\varphi=2\pi N+\Delta\varphi$  привести до значення  $\varphi=2\pi N$  (при якому, у вимірюваній дистанції, укладається ціле число напівхвиль модуляції). Це приведення можна здійснити або зміною частоти модуляції  $F$ , або зміною відстані  $D$ , вводячи в схему оптичну лінію затримки (ОЛЗ) змінної довжини [47, 48].

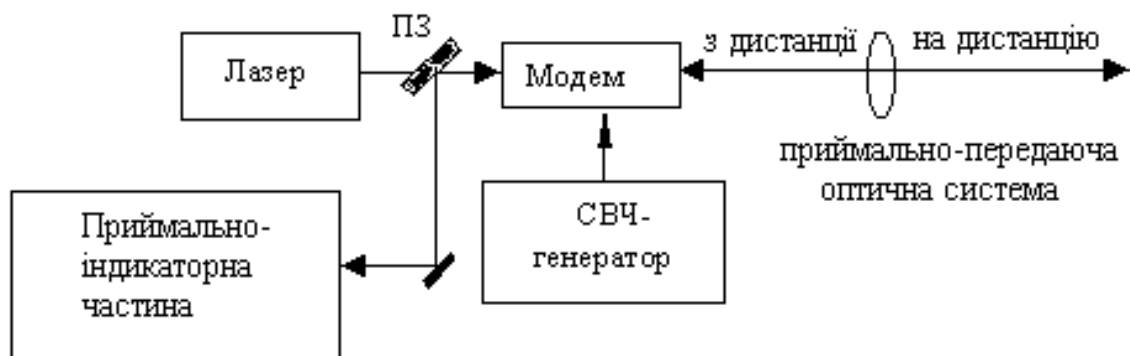


Рисунок 1.8. – Принцип побудови схеми з синхронною демодуляцією і суміщеними приймальним і передаючим трактами

Зафіксувавши умову  $\varphi=2\pi N$  (її називають *цілочисельною умовою*) по моменту нульової інтенсивності світла і вимірявши у цей момент частоту  $F$  або зміну відстані (величину  $d$ , відлічувану по оптичну лінію затримки), можна

обчислити довжину дистанції, що вимірюється, за співвідношеннями: в першому випадку (при частоті  $F$ , що вимірюється) [47, 48]

$$D = (v/2F)N = (\lambda/2)N \quad (1.6)$$

в другому випадку (при фіксованій частоті  $F$ )

$$D = (v/2F)N - d = (\lambda/2)N - d \quad (1.7)$$

В розглянутій схемі не вимагається лінії оптичного короткого замикання (ОКЗ) [19, 47, 48].

Імпульсно-фазові лазерні далекоміри. Чисто імпульсний (часовий) метод вимірювання відстаней (його можна назвати *моноімпульсним*, оскільки для визначення відстані достатньо одного імпульсу випромінювання), як вже *наголошувалося вище*, не отримав розповсюдження в наземній геодезії через його недостатньо високу точність, і застосовується в лазерних далекомірах, призначених для вимірювання дуже великих відстаней (до ШСЗ, до Місяця). Ці далекоміри є імпульсними за енергетичними міркуваннями; в них використовуються могутні імпульсні лазери, а відносна похибка вимірювань невелика через значну відстань [47, 48].

Проте імпульсний режим роботи має перевагу в тому відношенні, що при однаковій середній потужності випромінювання імпульсні далекоміри для наземних вимірювань мають більшу дальність дії, ніж фазові далекоміри з безперервним випромінюванням. Тому певна увага надана розробці лазерних далекомірів, поєднуючи імпульсний режим випромінювання, що дає підвищену дальність дії, з фазовим методом вимірювань, що дає високу точність. Такі далекоміри отримали назву *імпульсно-фазових*. [47, 48].

В імпульсно-фазовому далекомірі, окрім оптимізації по дальності і точності, з'являється також можливість вирішення проблеми неоднозначності, що властива фазовому методу, не застосуванням декількох частот модуляції, а шляхом наближеного вимірювання відстаней чисто імпульсним методом. Не вдаючись в детальний розгляд імпульсно-фазової віддалеметрії, вкажемо лише,



що можливі два основні способи здійснення імпульсно-фазових лазерних далекомірів. Перший спосіб полягає в модуляції імпульсів випромінювання високочастотним сигналом і вимірюванні зсуву фази модуляції, як у фазових далекомірах. Другий спосіб – використання гармонійних складових імпульсного сигналу, що дозволяє обійтися без додаткової модуляції. Стисло пояснимо, що тут мається на увазі. Імпульсний сигнал, що має достатньо стабільну частоту повторення, можна по теоремі Фур'є представити у вигляді суми гармонійних складових – спектру гармонік, кратних частоті повторення імпульсів. Спектр періодичної послідовності імпульсів дається виразом [47, 48]

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n), \quad (1.8)$$

де  $A_n$  – амплітуда  $\varphi_n$  – початкова фаза  $n$ -ої гармоніки. При проходженні відстані, що вимірюється, кожна гармоніка набуває додатковий зсув по фазі, рівний  $n\alpha(2D/v)$ , де  $n$  – номер гармоніки. Таким чином, виділивши певну гармоніку із спектру імпульсного сигналу в приймальному пристрої далекоміра, можна здійснити на ній фазові вимірювання. Відстань буде отримана тим точніше, чим вище номер гармоніки, тобто більше вимірювальна значення частоти, проте необхідно враховувати, що із збільшенням номера гармоніки зменшується її амплітуда [20, 47, 48].

### 1.3. Електронні тахеометри

Тахеометр – це електронно-оптичний прилад, який поєднує в собі електронний теодоліт, лазерний далекомір (далі по тексті — далекомір), обчислювальний пристрій і реєстратор інформації. Тахеометри використовуються для визначення планових координат і перевищень точок місцевості при топографічній зйомці місцевості, при розбивочних роботах, виносі на місцевість планових координат і висот проектних точок. Сервопривідні тахеометри можуть використовуватись для більш складних задач (3D сканування поверхонь об'єктів, моніторинг та ін.) [47, 48, 49].

За типом далекоміра та способом реєстрації результатів вимірювань, тахеометри поділяються на:

- оптико-механічні (з власною базою, номограмні, подвійного зображення);
- електронно-оптичні;
- електронні;
- реєструвальні.

Більшість сучасних тахеометрів є безвідбивачевими [49].

За типом механізму обертання електронні тахеометри поділяються на механічні та сервопривідні. Механічні тахеометри, при роботі з якими геодезист наводить зорову трубу на ціль вручну, за допомогою навідних гвинтів, відрізняються більшою простотою в роботі та меншою вартістю. В сервопривідних моделях обертання аліади та зорової труби тахеометра виконують допоміжні механізми (сервоприводи), завдяки чому підвищується продуктивність праці, бо оператор має змогу керувати приладом дистанційно, знаходячись з боку вішки на значній відстані [47, 48, 49].

Тахеометр включає в себе:

- електронний теодоліт (кутомір);
- електронний далекомір;
- GPS-приймаючий пристрій;
- обчислювальний пристрій з пам'яттю, для вимірювання похилих відстаней до заданих точок, горизонтальних і вертикальних кутів, та перетворення результатів із сферичної до декартової системи координат [47, 48, 49].

Блок контрольного відліку (БКВ) призначений для проведення оперативного контролю далекоміра і виконаний у вигляді кришки на об'єктив зорової труби. В середині кришки встановлена призма [47, 48, 49].

Результат вимірювання відстані до призми блоку контрольного відліку (контрольного відлік) при випуску з підприємства-виробника записують у розділі 1 паспорту тахеометр) [47, 48, 49].

Фокусування зорової труби здійснюється обертанням кільця 7 кремальєри (рис. 1.10). [47, 48, 49].

Окуляр регулюється обертанням діоптрійного кільця 6 до отримання чіткого зображення штрихів сітки ниток. При роботі в темний час доби сітка ниток підсвічується світлодіодом, [49].

Точне наведення зорової труби у вертикальній площині виконують навідним гвинтом 11, в горизонтальній — навідним гвинтом 13 [21, 22, 47, 48, 49].

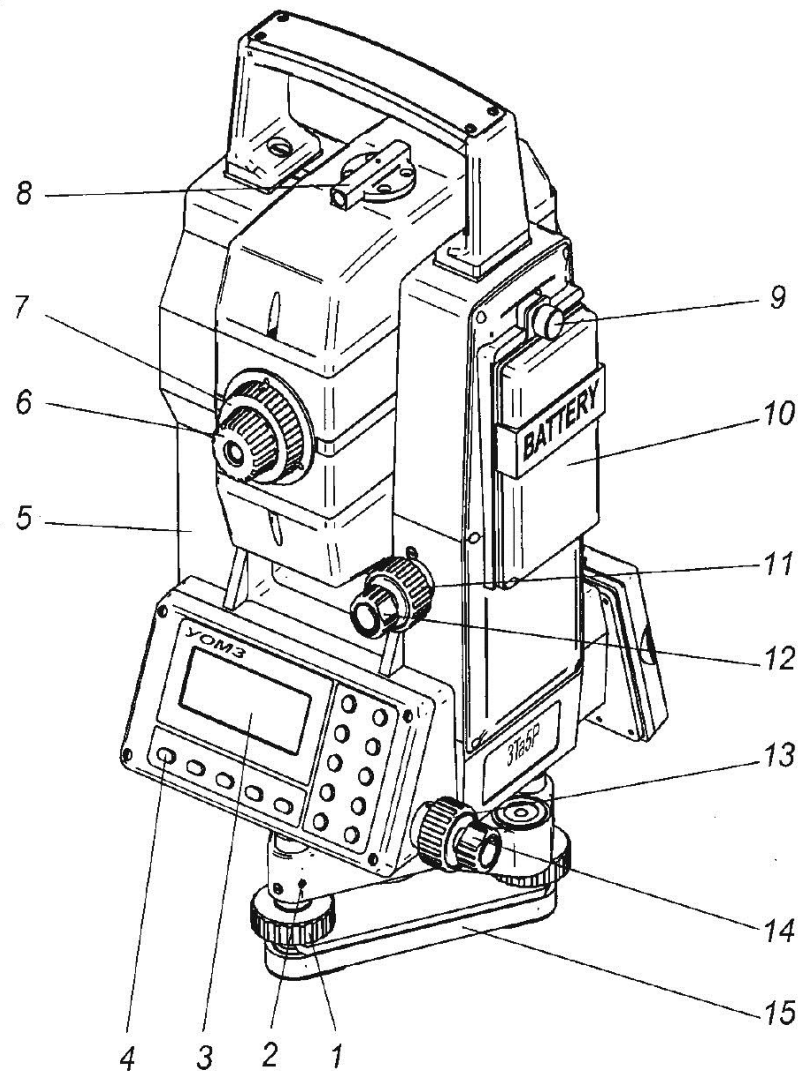


Рисунок 1.9. – Тахеометр (положення: зліва): 1 – підйомний гвинт; 2 – юстувальний гвинт; 3 – дисплей; 4 – кнопка ввімкнення/вимкнення; 5 – колонка; 6 – діоптрійне кільце; 7 – кільце кремальєри зорової труби; 8 – коліматорний візор; 9 – гвинт; 10 – касетне джерело живлення; 11,13 – навідний гвинт; 12, 14 – закріпний гвинт; 15 – підставка. [49]

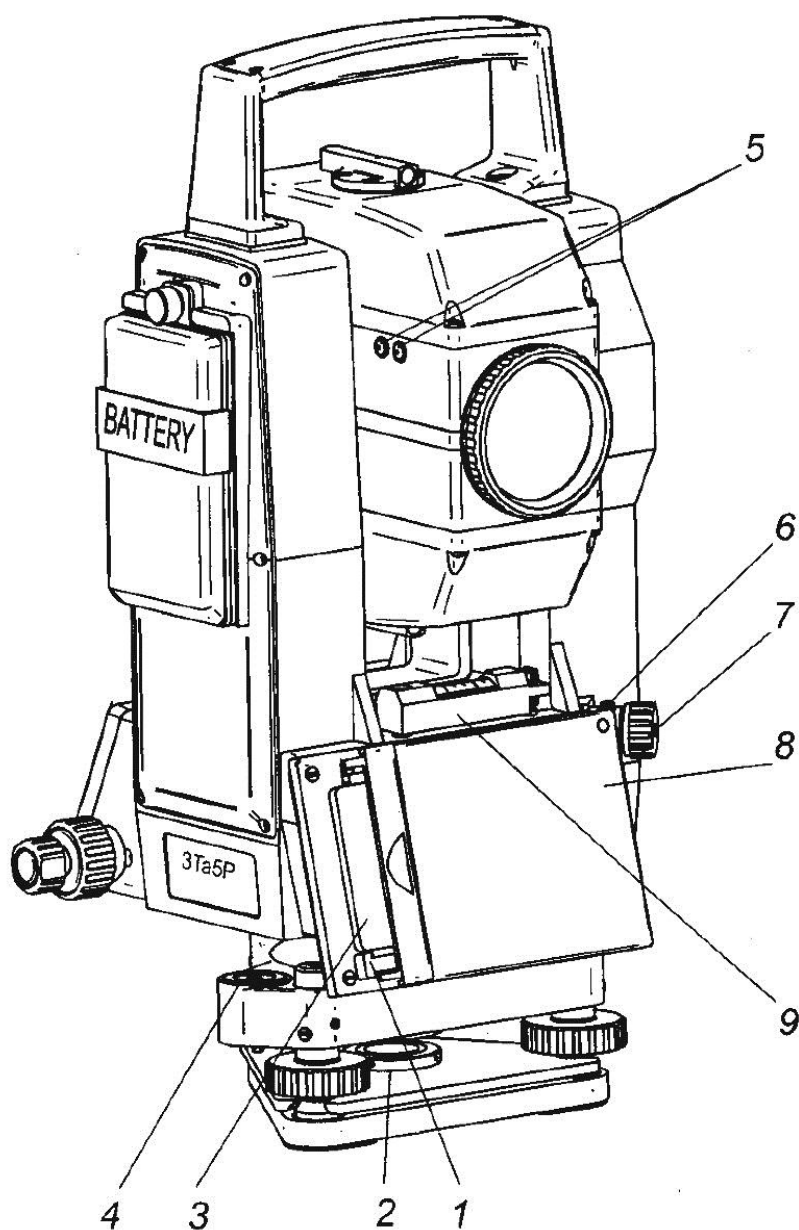


Рисунок 1.10 – Тахеометр (положення: справа): 1 – кнопка інжектора (всередині вузлового пристрою з'єднання); 2 – юстувальна гайка; 3 – карта пам'яті (всередині вузлового пристрою з'єднання); 4 – круглий рівень; 5 – клема; 6 – юстувальний гвинт центрира; 7 – окуляр оптичного центрира; 8 – вузловий прилад БСПС з'єднання з картою пам'яті; 9 – циліндричний рівень [49].

При цьому відповідні закріпні гвинти 12, 14 потрібно повернути за годинниковою стрілкою. На втулках навідних гвинтів нанесені кругові поділки, що відповідають середньому положенню навідних гвинтів [47, 48. 49].

Тахеометр горизонтують (вертикальну вісь встановлюють в прямовисне положення) за допомогою круглого рівня, який встановлено на підставці, і циліндричного рівня 9 (рис. 1.11) [47, 48, 49].

Окуляр 7 оптичного центрира регулюють обертанням діоптрійного кільця до отримання чіткого зображення кіл сітки ниток. Поздовжнім переміщенням окулярної частини центрир фокусують на точку місцевості [47, 48, 49].

Тахеометр має панель керування з дисплеєм 3 (рис. 1.10) і вузловий прилад БСПС з'єднання з картою пам'яті 8 (рис. 1.11). На бічній кришці встановлені роз'єми для підключення зовнішнього джерела живлення і персонального комп'ютера [23, 24, 47, 48, 49].

Електронним тахеометром називають прилад, що дозволяє виконувати як кутові, так і лінійні вимірювання з можливістю сумісної їх обробки. Електронний тахеометр є об'єднанням теодоліта, лазерного далекоміра з напівпровідниковим випромінювачем і мікропроцесора або мікрокомп'ютера в єдину нероз'ємну або модульну конструкцію. Крім того, прилад, що володіє функціями електронного тахеометра, має змогу бути одержаний при установці малогабаритного автоматизованого топографічного лазерного далекоміра на оптичний або електронний теодоліт. Саме так конструювалися електронні тахеометри першого покоління. В цьому випадку реєстрація результатів кутових і лінійних вимірювань проводиться роздільно і для їх сумісної обробки необхідний зовнішній обчислювальний пристрій, який у вигляді окремого блоку має змогу, як у випадку 3, закріплюватись на штативі теодоліта. В електронних же тахеометрах нероз'ємної конструкції обчислювальний пристрій вбудований в сам прилад, а клавіатура управління виведена на передню панель приладу [25, 47, 48, 49].

Електронні тахеометри можуть бути розділений на два типи:

- електронні тахеометри з візуальним відліком кутів (позначимо їх ЕТ/В) [49];

- електронні тахеометри з електронним відліком кутів (позначимо їх ET/E) [49].

В ET/B кутомірна частина тахеометра є оптичним теодолітом з шкаловим мікроскопом або оптичним мікрометром; в ньому відліки, що знімаються візуально вводяться в процесор ручним набором на клавіатурі. В ET/E кутомірна частина є електронним теодолітом з цифровою індикацією кутових величин на табло. Лінійні величини (результат далекомірних вимірювань) виводяться в цифровому вигляді на табло в обох типах тахеометрів [47, 48, 49].

Тахеометри типу ET/E в зарубіжній літературі називають «універсальними станціями» (Total Station). Автоматизація в електронних тахеометрах і узагальнена схема їх будови [27, 49].

Функції управління, контролю і обчислення здійснюються за допомогою мікропроцесора. На табло можуть видаватися похила відстань, горизонтальне прокладання, перевищення, горизонтальні і вертикальні кути або зенітні відстані по команді з пульта управління процесора [47, 48, 49].

В сучасних електронних тахеометрах використовуються мікрокомп'ютери, що є поєднанням мікропроцесора з пам'яттю і пристроями введення і виведення даних [47, 48, 49].

В цьому випадку дані можуть не тільки видаватися на табло, але також реєструватися в пристрої, що запам'ятовує, і можуть бути виведені на зовнішній накопичувач або зразу ж обробляються відповідно до постійно закладених в пам'ять («защитих») програм, дозволяючи безпосередньо в польових умовах одержувати координати пунктів і проводити інші спеціальні і контрольні обчислення, мають зв'язок з вирішенням різних геодезичних задач [47, 48, 49].

Результати цих обчислень також можуть видаватися на табло, записуватися в пам'ять і можуть бути передані на зовнішній накопичувач інформації, що підключається до приладу. Узагальнена структурна схема таких електронних тахеометрів показана на рис.1.12 [28, 47, 48, 49].

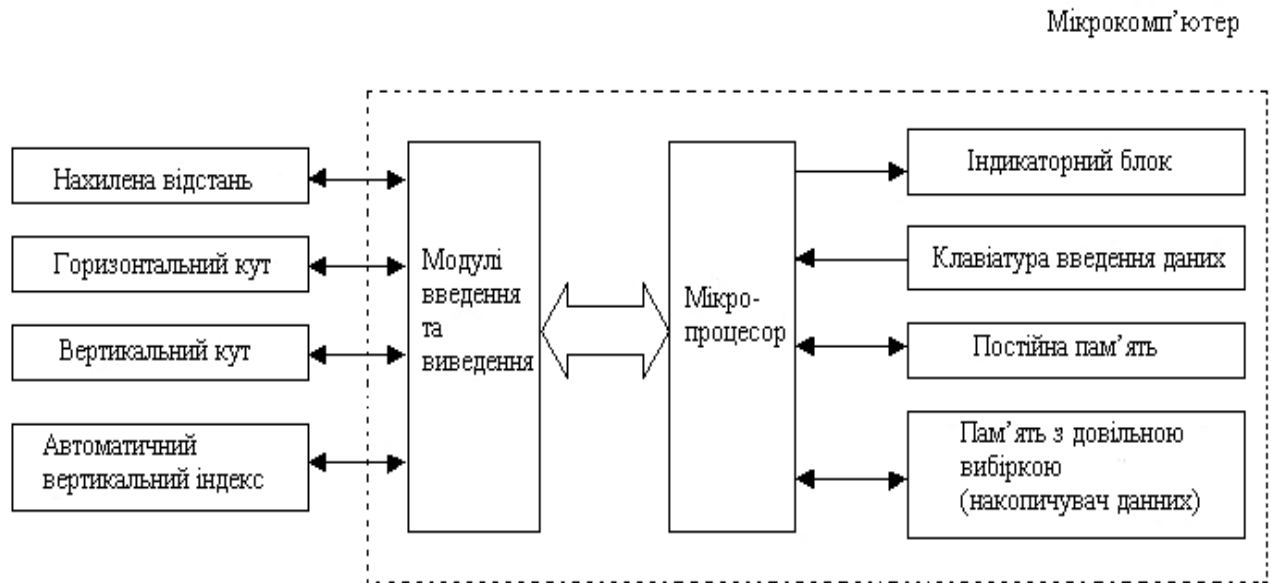


Рисунок 1.11. – Узагальнена структурна схема електронного тахеометра

В сучасних електронних тахеометрах табло індикаторного блоку є багатофункціональним цифровим дисплеєм на декілька рядків, на якому має змогу відобразитися різна додаткова інформація [29, 30, 47, 48, 49].

#### 1.4. Аналіз розвитку безпроводних сенсорних приладових систем як технології вимірювання механічних величин

Історія створення безпроводних сенсорних приладових систем (БСПС) нараховує більше чотирьох десятиків років. Як і в випадку для достатньо великого кількостей технологій, в тому числі і телекомунікаційних, першими роботами над сенсорного пристрою БСПСми і безпроводні сенсорні приладові системи були ініційованими в оборонному секторі США. Неможна виключати, що подібні роботи проводились в ССРСР. Проте досі відкрита інформація про це відсутня. На початку 50-х років під час холодної війни з метою виявлення і спостереженням за радянськими малошумними підводними човнами була розроблена і розгорнута підводна система спостереження SOSUS (Sound Surveillance System), яка складалась із набору акустичних сенсорів (гідрофонів), розміщених на дні океану, яку вважають одним із перших прототипів сенсорної БСПС. Система *SOSUS* була переорієнтована на цивільний сектор і досі використовується національною океанографічною і атмосферною адмініс-

трацією NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) для моніторингу, як у випадку з, сейсмічної активності [34]. Також під час холодної війни в оборонному комплексі було розроблене проти повітряний комплекс захисту континентальної частини території держав США і Канади [34, 46].

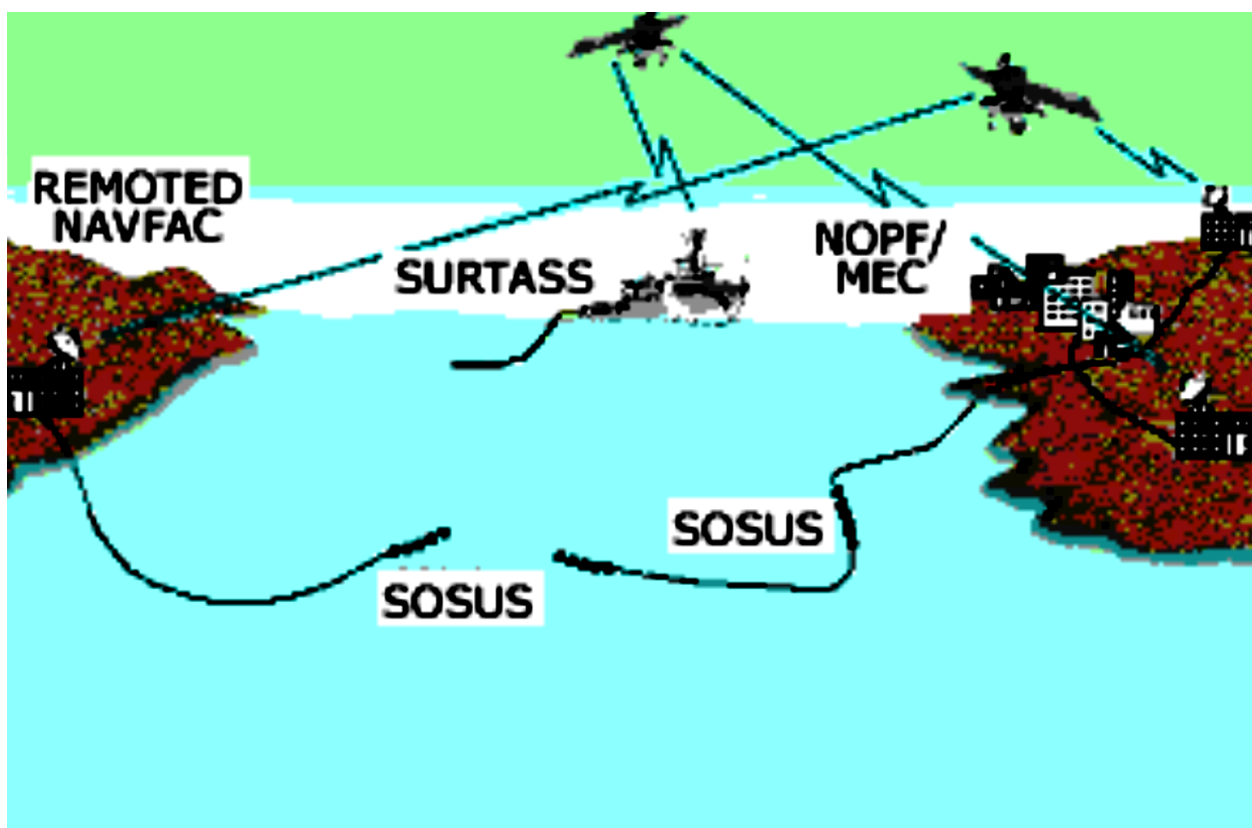


Рисунок 1.12. – Підводна система спостереження SOSUS

Особливістю цього комплексу, що дозволяє говорити про нього як про прототип безпроводних сенсорних приладових систем, являлося використання аеростатів в якості здійснення контролю і збору інформації. Пізніше протиповітряна система була доповнена літаками повітряного попередження і управління AWACS (*Airborne Warning and Control System*) [34, 35, 46].

Ці дві військові системи є наглядним прикладом побудови безпроводних сенсорних приладових систем на дуже ранній стадії їх розвитку коли мова про підвищені ефективності, оптимізації, автономності і зниженні вартості ще не йшла, а людина грала одну з основних ролей в процесі функціонування цих систем – саме на людину покладалась відповідальність за функціонування, надійність, аналіз даних [34, 46].



В безпроводних сенсорних приладових систем датчики можуть бути найрізноманітнішими; вони підключаються через цифрові і аналогові коннектори. Частіше за інших використовуються датчики температури, тиску, вологості, освітленості, вібрації, рідше — магнітоелектричні, хімічні (як у випадку з, що вимірюють зміст CO, CO<sub>2</sub>), звукові і деякі інші [34, 36]. Набір датчиків залежить від функцій, що виконуються безпроводними сенсорними приладовими системами. Живлення вузлових пристроїв здійснюється від невеликої батареї та використовуються тільки для збору, первинної обробки і передачі сенсорних даних по вимірювальному каналу. Зовнішній вигляд вузлових пристроїв, що випускаються різними виробниками, наведено на рисунку 1.14 [34, 46].

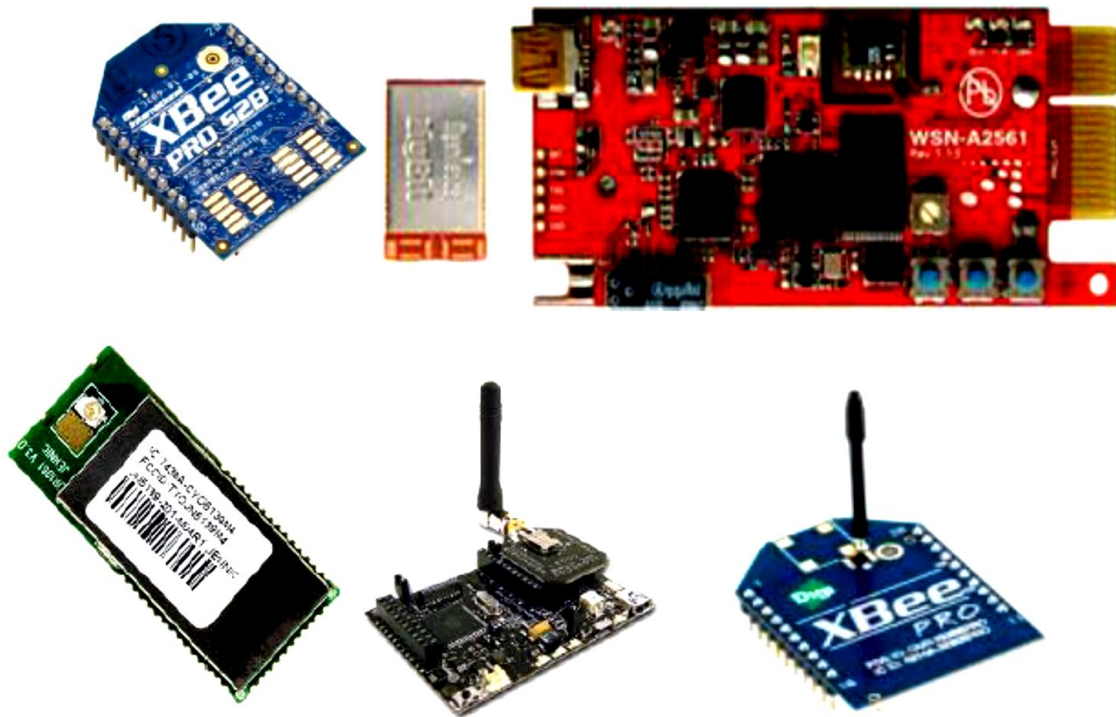


Рисунок 1.13. – Зовнішній вигляд сенсорних вузлових пристроїв

Безпроводні сенсорні приладові можуть бути використані у багатьох прикладних галузях. Безпроводні сенсорні приладові — це нова перспективна технологія, і усі мають зв'язок з нею проекти в основному знаходяться у стадії розробки. Вкажемо основні сфери застосування цієї технології [34, 46]:

- системи оборони і забезпечення безпеки;

- контроль навколишнього середовища;
- моніторинг промислового обладнання;
- охоронні системи;
- моніторинг стану сільськогосподарських угідь;
- управління енергопостачанням;
- контроль систем вентиляції, кондиціонування і освітлення;
- пожежна сигналізація;
- складський облік;
- стеження за транспортуванням вантажів;
- моніторинг фізіологічного стану людини;
- контроль персоналу [34, 37, 46]..

З досить великого числа прикладів використання безпроводних сенсорних приладових систем виділимо декілька. Найбільш відомим є, мабуть, розгортання безпроводних сенсорних приладових систем на борту нафтового танкера компанії *BP (British Petroleum)*. Там за допомогою безпроводних сенсорних приладових систем, побудованої на основі обладнання *Intel*, здійснювався моніторинг стану судна з метою організації його профілактичного обслуговування. Компанія *BP* проаналізувала, чи має змогу безпроводна сенсорна приладова система працювати на борту судна в умовах екстремальних температур, високої вібрації і значного рівня радіочастотних перешкод, наявних в деяких приміщеннях судна. Експеримент пройшов успішно, кілька разів автоматично здійснювалася реконфігурація та відновлення працездатності безпроводних сенсорних приладових систем [34, 37, 46].

Прикладом ще одного реалізованого пілотного проекту є розгортання безпроводних сенсорних приладових систем на базі військово-повітряних сил США у Флориді. Система продемонструвала хороші можливості по розпізнаванню різних металевих об'єктів, у тому числі рухомих [34, 46].

Застосування безпроводних сенсорних приладових систем дозволило виявляти проникнення людей і автомобілів в контрольовану зону і

відслідковувати їх переміщення. Для вирішення цих завдань використовувалися вузлові пристрої, оснащені магнітоелектричними і температурними датчиками [34, 46].

Ще один приклад реалізованого проекту – SISVIA (SIstema de Seguimiento y VIgilancia Ambiental) спільної комерціалізації проекту з охорони навколишнього середовища, були розроблені та інтегровані для виявлення лісових пожеж за допомогою БСПС рис. 1.15 [34, 37, 38, 39, 46].

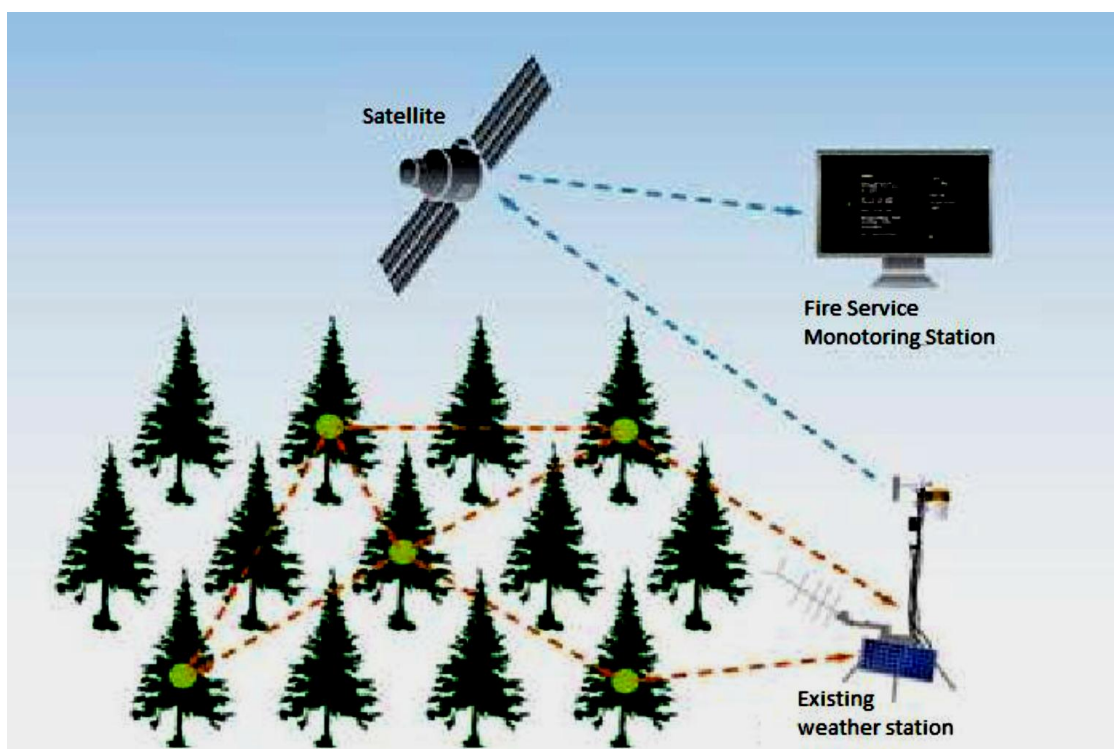


Рисунок 1.14. – Комп'ютеризована сенсорна система вимірювання механічних величин для виявлення лісових пожеж

Площею близько 210 га в районі Північної Іспанії в складі регіонів Asturias і Galicia. Для рішення даної проблеми була використано сенсори які розташовані в стратегічних місцях та кожних 5 хвилин вимірюють 4 параметри: температуру, відносну вологість повітря, чадний газ (CO), діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>) Мета полягає в тому, щоб надати різним організаціям інфраструктуру моніторингу навколишнього середовища, з можливістю мати попередження управління і попередження ранніх тривог, в тому числі і шляхом прогнозування

[40, 41]. Крім профілактичних заходів, раннє виявлення пожеж є єдиним способом, щоб мінімізувати збитки та людські жертви [34, 42, 43, 44, 45, 46].

Можливості сучасної мікроелектроніки і безпроводних технологій відкривають великі перспективи для створення різноманітних комплексів з широкою сферою застосування. Найбільш відомою технологією, що зарекомендувала себе в цій галузі являється технологія безпроводних сенсорних приладових систем. Основною їх відмінністю від класичних радіосистем є використання, як основних вузлових пристроїв приладової системи, великого числа недорогих мікрокомп'ютерів. Дані прилади настільки автономні, що можуть автоматично вибудовувати розподілену безпроводну сенсорну приладову систему, передавати інформацію, шляхом знаходження один одного на відстані до декількох кілометрів, автоматично приймати рішення, і виконувати завдання без участі людини, із застосуванням відповідних методів їх захисту [34, 46].

Основною задачею даних досліджень є розробка та дослідження методів та засобів вимірювання механічних величин, що поєднують можливості вищеписаних технологій [34, 46].

### **Висновки до розділу 1**

1. Проведено аналіз приладів та систем, що використовуються у класичних засобах вимірювальної техніки та БСПС для вимірювання відстані між об'єктами, що має змогу дати змогу порівнювати та коригувати параметри, що одержані методами метрології та комп'ютеризованих технологій.

2. Розглянуто основні методи вимірювання відстані, що використовуються для досліджень у даній роботі.

3. Проаналізовано сучасні вимірювальні прилади та сенсорні БСПС на предмет вимірювання відстані між об'єктами.

4. Розглянуто основні методи та принципи роботи лазерних далекомірів. Проведено аналіз використання мікропроцесорного ППФС у приладах вимірювання механічних величин.

5. Проведено аналіз електронного тахеометра, як комп'ютеризованого засобу вимірювання механічних величин.

6. Проведено аналіз історії використання БСПС, у відомих вимірювальних системах, що використовувались та використовуються для своєчасного виявлення імовірності стихійних лих чи техногенних катастроф та застосовували комп'ютеризовані системи вимірювання механічних величин.

7. Виявлено, що задачі БСПС, у більшості випадків, співпадають з задачами дослідження та застосування приладів та методів вимірювання механічних величин, що дозволяє їх розглядати, як частини цілісної інформаційної вимірювальної системи, в сучасних умовах науково-технічного прогресу [34].

### **ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 1**

1. Квасніков В.П. Аналіз приладів вимірювання відстані та безпроводних сенсорних мереж /В.П. Квасніков, А.С. Дуднік [текст] // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 4. – С.115 -118.

2. Kvasnikov V. P. Kontseptsiya povirky koordynatno-vymiryval'nykh mashyn cherez Internet [текст] / V. P. Kvasnikov, T. M. Khaeyn // Metrolohiya ta prylady. – 2013 . – # 6. – S. 48–53. <http://ua.amu.in.ua/journal1>

3. Kvasnikov V. P. Nova metodyka rozrakhunku datchyka deformatsiy [текст] / V. P. Kvasnikov, T. I. Hanyeva // Vymiryval'na ta obchyslyval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh – 2015. - # 3 (52). – S. 169-173. <http://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/41E185F3-5121-491D-84A7-F1E92DE5FB6E.pdf>

4. Kvasnikov V.P. Method of measurement of stress in loaded structures [текст] / V.P. Kvasnikov, T.I.Ganeva // Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». Founder: «Ukrmetallurginform «Scientific and Technical Agency», Ltd, №7, 2015, p. 340-343.

5. Kvasnikov V.P. Rozrobka ta doslidzhennya intelektual'noyi systemy dlya analizu ymovirnisnykh kharakterystyk vypadkovykh protsesiv mekhanichnykh velychyn [текст] / V.P. Kvasnikov, Yu.P. Leshchenko // Tekhnolohycheskyy audyt y rezervy proyzvodstva. – 2015. - # 5/3 (25). – S. 100-102.

6. Ornatskij D.P. Optimizacija analogovogo interfejsa informacionno-izmeritel'nyh sistem dlja distancionnyh izmerenij mehanicheskikh velichin [текст] / D.P. Ornatskij, V.P. Kvasnikov, A.I. Osmolovskij // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2014. – №4 (70). – S. 31-37.  
<http://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-analogovogo-interfejsa-informatsionno-izmeritelnyh-sistem-dlya-distantsionnyh-izmereniy-mehanicheskikh-velichin>

7. Artyushenko V.M., Solenov V.I. Otsenka tochnosti izmereniya informatsionnogo parametra signala na fone additivnoy negaussovoy pomekhi [текст] // Vestnik MGTU. Seriya Priborostroyeniye. 1997. №4.–S.9-14.

8. Institute of Electrical and Electronics Engineers / Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology — telecommunications and Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements — Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. – 2003. – P. 250.

9. Luntovs'kyi A.O. Osnovy proektuvannya bezprovodovykh komp'yuternykh merezh /A.O. Luntovs'kyi, I.V. Mel'nyk//: navchal'nyy posibnyk. – K.: Universytet «Ukrayina», 2011. – 360 s.

10. Shteynvol'f A.L. Raschety i imitatsiya negaussovykh sluchaynykh vibratsiy.-K.: Naukova dumka.-1993.-250 s.

11. Sotsiolohiya: slovnyk terminiv i ponyat' / uklad. YE. A. Bilen'kyi, M. A. Kozlovets', V. O. Fedorenko ; rets. M. V. Levkivs'kyi, S. P. Shcherba. – Zhytomyr : Volyn' : Ruta, 2003. – 233 s.

12. Stukhlyak P.D. Teoriya informatsiyi (informatsiyno-vymiryuval'ni systemy, pokhybky, identyfikatsiya) / P.D. Stukhlyak, O.V. Ivanchenko, A.V. Buketov, M.A. Dolhov //: navchal'nyy posibnyk. — Kherson: Aylant, 2011. — 371 s.

13. Kvasnikov V. Relevance analysis of measurement mechanical quantities in the composition of the network “internet of things” and systems of professional cooperation during metrological studies /V. Kvasnikov, A. Dudnik, Yu. Bondarenko // Relevant issues of development and modernization of modern science: the experience of countries of Eastern Europe and prospects of Ukraine: **monograph** / edited by authors. – Riga, Latvia : Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2018. – P. 144 - 159. [http://dx.doi.org/10.30525/978-9934-571-26-8\\_8](http://dx.doi.org/10.30525/978-9934-571-26-8_8) (**Riga, Latvia**)

14. ZIGBEE STANDARDS [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.zigbee.org/Standards/>. ZigBee Technical Documents. - Title with title. Screen.

15. Kunchenko YU.P. Stokhasticheskiye polinomy, ikh svoystva i primeneniye dlya nakhozhdeniya otsenok parametrov. - Cherkassy.: CHITI.- 2002. - 240 s.

16. Pudlo M. Tachimetry [текст] – Podsumowanie Roku 2005 // Geodeta. – 2005. – № 12. – S. 64–73.

17. Дуднік А.С. Метод вимірювання відстані між об'єктами сенсорних мереж засобами мікропроцесорного фазометра [текст] /А.С. Дуднік // Технічні науки та технології. – 2018. Вип. № 2(12). С. 136 -141. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-136-141](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-136-141) (**Index Copernicus, OJS, ResearchBib, WorldCat, BASE ПИИЦ**)

18. Stukhlyak P.D. Teoriya informatsiyi (informatsiyno-vymiryuval'ni systemy, pokhybky, identyfikatsiya) [текст] / P.D. Stukhlyak, O.V. Ivanchenko, A.V. Buketov, M.A. Dolhov //: navchal'nyy posibnyk. — Kherson: Aylant, 2011. — 371 s

19. TACHIMETRY [текст] //DODATEK Geodeta. – 2008. – NR 12. – 42 s.

20. Грошев В.В., Романчикова М.С. Тенденции и перспективы дальнейшего развития технологий [текст] // Геопрофи. – 2008. – № 5. – С. 6–12.
21. Костецька Я.М. Геодезичні прилади. Частина 2. [текст] – Львів: Престиж інформ, 2000. – 324 с.
22. Шевченко Т. Г., Мороз О. І., Тревого І. С. Геодезичні прилади [текст] /: Підручник – Львів: Видавництво Національного університету ”Львівська політехніка”, 2006. – 462 с.
23. Мацко П.В., Голубев А.М. Введення в геотроніку [текст] /: Навчальний посібник. – Херсон, ХДУ, 2006.–100с.
24. Большаков В.Д., Деймах Ф., Голубев А.М., Васильев В.П. [текст] / Радио геодезические и электрооптические измерения. М., 1985
25. Голубев А.Н. Основы геотроники. Электронные методы и средства геодезических измерений [текст] /: Учебное пособие для студентов геодезических специальностей вузов. – М., МГУГиК. 2003. – 87 с.
26. Мацко П.В. Космічна геодезія. Глобальні супутникові навігаційно-геодезичні системи в землевпорядкуванні. [текст] / – Херсон. : Айлант, 2002. - 44с.
27. Шануров Г.А., Мельников С.Р. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ [текст] /: Учебное пособие – М.; ЧПП «Репрография» МИИГАиК, 2001 – 136 с.
28. Голубев А.Н., Шануров Г.А. Геотроника: наука и учебная дисциплина // [текст] / Сб... 220 лет геодезическому образованию в России: М., 1999. с. 32-36.
29. Лук’яненко М., Кривовяз А., Орел О. Можливості використання супутникової апаратури вітчизняного виробника в геодезичних роботах. [текст] / Зб. наук пр. Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. – Львів, 2001. с. 74-78



30. Кучер О., Лепетюк Б., Стопхай. Ю. та інші. Супутникові радіонавігаційні спостереження при реалізації геодезичної референцної системи координат України - [текст] / УСК 2000 // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів, 2005. с. 26-32
31. Карпінський Ю., Лященко А. Аналіз міжнародного досвіду створення інфраструктури геопросторових даних [текст] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів, 2006. с. 151-164
32. Геодезичні прилади. Робота з електронним тахеометром 3Та5Р: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт [текст] / Укл.: Н. Ю. Лазоренко-Гевель, Б. І. Денисюк. – К.: КНУБА, 2014. – 34с.
33. Тахеометр электронный 3Та5Р. [текст] /: Руководство по эксплуатации 3Та5-сб0-04 РЭ. – УОМЗ, Екатеринбург, 2009. – 89 с.
34. Дуднік А. С. Приклади застосування безпроводних сенсорних мереж у якості засобів вимірювання механічних величин [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №4. **(ПИНЦ, ScholarGoogle, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)** – Режим доступу: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2018/4/42.pdf>
35. Akyildiz I. F. Wireless sensor networks: A survey. Computer Networks [текст] // IEEE Communications Magazine. –2002. – P.250.
36. Sound Surveillance System (SOSUS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.fas.org/irp/program/collect/sosus.htm>. Federation of American Scientists. – Назва з титул. екрану.
37. National Oceanic and Atmospheric Administration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.noaa.gov/index.html>. National Oceanic and Atmospheric Administration. – Назва з титул. екрану.
38. Airborne early warning and control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://en.wikipedia.org/wiki/Airborne\\_early\\_warning\\_and\\_control](http://en.wikipedia.org/wiki/Airborne_early_warning_and_control). Wikipedia, the free encyclopedia. – Назва з титул. екрану.

39. Dudnik A. Evaluation of wireless signal computerized systems of measurement of mechanical quantities at constant distance in medium fire [Текст] / A. Dudnik, Yu. Bondarenko // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2018. # 21. Vol. 2. P. 56 -60. (**eLIBRARY.RU**) (Oslo, Norway)

40. Дуднік А.С. Математичні моделі прогнозування для хмарних комп'ютеризованих систем [Текст] / А.С. Дуднік, Л.І. Кубушка В.О. Погіба // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 3. – С.98 -103.

41. Дуднік А.С. Метод математичного прогнозування за допомогою часових рядів [Текст] / А.С. Дуднік, Л.І. Кубушка В.О. Погіба // Актуальні проблеми інформаційних технологій: наук.-практ. конф., 8 – 10 листопада 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – С. 33.

42. SISVIA (SIstema de Seguimiento y VIgilancia Ambiental) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dimap.es/news.html>. Technology and environment. – Назва з титул. екрану.

43. Detecting Forest Fires using Wireless Sensor Networks [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.libelium.com/wireless\\_sensor\\_networks\\_to\\_detec\\_forest\\_fires/](http://www.libelium.com/wireless_sensor_networks_to_detec_forest_fires/). Libelium word . – Назва з титул. екрану.

44. Скуратовський Р.В. Властивості скрученої кривої Едвардса, можливість поділу точки навпіл і їх застосування в криптографії [Текст] / Скуратовський Р.В., А.С. Дуднік, Д.М. Квашук // Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2017. – Вип. № 4 (60). – С. 71 – 78. (**РИНЦ, WorldCat, BASE**)

45. Дуднік А.С. Взаимодействие технологий «интернет вещей» и «блэйчейн» при измерении механических величин [Текст] / А. С. Дуднік, Л. Мелконян // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси: XI міжнар. наук.-практ. конф., 22 – 23 травня 2018 р.: тези допов. – К., 2018. – С. 285 – 287.

46. Мандзій В.А. Метод локалізації об'єктів на основі вимірювання потужності сигналу в безпроводних сенсорних мережах: дип...магістра: 8.05010201 "Комп'ютерні системи та мережі" [Електронний ресурс]/ Мандзій Віталій Анатолійович. – Тернопіль, 2012. – 90 с. – Режим доступу: <http://dspace.tneu.edu.ua/bitstream/316497/1473/1/Mandziy+V.A.%2C+KSMm-51.pdf>

47. Напрями розвитку електронної тахеометрії [електронне видання]/ режим доступу: [http://oplib.ru/dom/view/94632\\_napryami\\_rozvitku\\_elektronno\\_taxeometr](http://oplib.ru/dom/view/94632_napryami_rozvitku_elektronno_taxeometr)

48. Напрями розвитку електронної тахеометрії [електронне видання]/ режим доступу: <http://oplib.ru/random/view/94632>

49. І. Тревого, А. Баландюк Сучасні тенденції розвитку та класифікації електронних тахеометрів [Електронне видання] /І. Тревого, А. Баландюк// Геодезія і геодинаміка – Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/5979/1/43.PDF>

50. Олійник І.М. Методи вимірювання дальності [Електронне видання] Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2015/inrtzp/txt/oliynik.pdf>

51. Пеньков В.О. Малі електронні віддалеміри в будівництві /В.О.Пеньков// Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсів «ГЕОДЕЗІЯ», «ІНЖЕНЕРНА ГЕОДЕЗІЯ», «ТОПОГРАФІЯ» [Електронне видання] Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/33485/1/2012%2073%D0%9C%20%D0%9B%D0%90%D0%97%D0%95%D0%A0%D0%9D%20%D0%94%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80..pdf>

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ЗАСОБАМИ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ ПРИЛАДОВИХ СИСТЕМ

Комп'ютеризовані системи вимірювання механічних величин, що включають засоби БСПС, можуть бути розділені на три відмінні компоненти:

1. Оцінка відстані або кута: цей компонент відповідальний за оцінку інформації відстаней та/або кутів між двома вузловими пристроями. Така інформація використовуватиметься іншими компонентами системи локалізації [1, 6, 35].

2. Обчислення позиції розташування: цей компонент відповідальний за обчислення позиції вузлового пристрою, заснованої на доступній інформації відстаней/кутів і позиціях вузлових пристроїв довідкової інформації [1, 6, 35].

3. Алгоритм локалізації: це – основний компонент системи локалізації. Він визначає, яким чином наявна інформація буде оброблятися, з тим щоб всі або майже всі вузлові пристрої БСПС оцінили свої позиції.

Спрощена процесу локалізації БСПС представлена на рис. 2.1. [1, 2, 35].

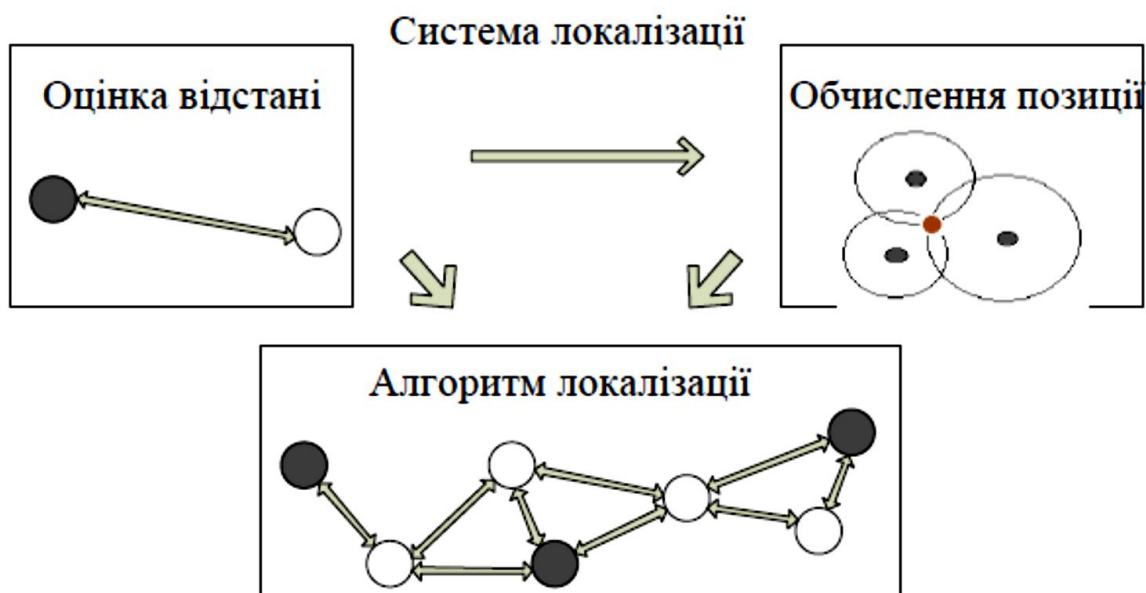


Рисунок .2.1. – Модель алгоритму локалізації

Також невід'ємним компонентом приладів та систем вимірювання відстані, часових параметрів або кутів є мікропроцесорні блоки оцінки вимірювальних параметрів, такі, як мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-

кутових величин на основі частоти, фази та потужності сигналу, Методів поєднання цих компонентів з безпроводними сенсорними вузловими пристроями, в літературі не міститься. Тому задачею даного розділу є аналіз та розробка методів побудови комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин, на основі БСПС, із включенням до їх складу компонентів класичних вимірювальних приладів [35, 36].

За результатами досліджень, проведених у даному розділі, автором опубліковані роботи [1, 6-7, 12, 14-15, 24, 30-31, 33-37].

## **2.1. Аналіз методів оцінки відстані засобами безпроводних сенсорних приладових систем**

### **2.1.1. Метод оцінки відстані на основі вимірювання падіння потужності**

Найбільш простим методом визначення дальності до вузлового пристрою є індикація рівня прийнятого сигналу (Received Strength Signal Indication, RSSI). RSSI – в телекомунікації, пристрій для вимірювання рівня потужності сигналу [1,2, 6, 35, 36].

Найпростіші схеми розробляються, щоб прийняти вхідний сигнал і сформувати аналогову вихідну напругу (або відповідний цифровий код, одержаний після подачі цієї напруги на АЦП), пропорційне потужності прийнятого сигналу [35, 36].

Можна використовувати даний показник, щоб оцінити відстань до передавальний пристрою (від стільникових телефонів – до базової станції) [36].

Як правило, сигнал вимірюється на проміжних значення частот перед підсилювачем (як у випадку з, у стільникових телефонах і інших GSM-пристроях). У пристроях, які працюють без використання проміжних частот, вимірювання ведеться на основній частоті [3, 36].

Будь-який безпроводний вимірювальний канал за стандартом IEEE 802.15.4 має протокольну функцію оцінки якості зв'язку (Link Quality Indicator), дія якого зводиться до визначення потужності прийнятого сигналу. [3, 36].

Результат цього виміру можна вивести, відкалібрувати по відомій відстані і оцінити дальність до джерела [35, 36].

Як зображено на рисунку 2.2, вузловий пристрій посилає сигнал з певною потужністю, яка зменшена, оскільки цей сигнал розмножений. Чим більше відстань до вузлового пристрою одержувача, тим нижче потужність сигналу, у вузлі отримувачі [35, 36].

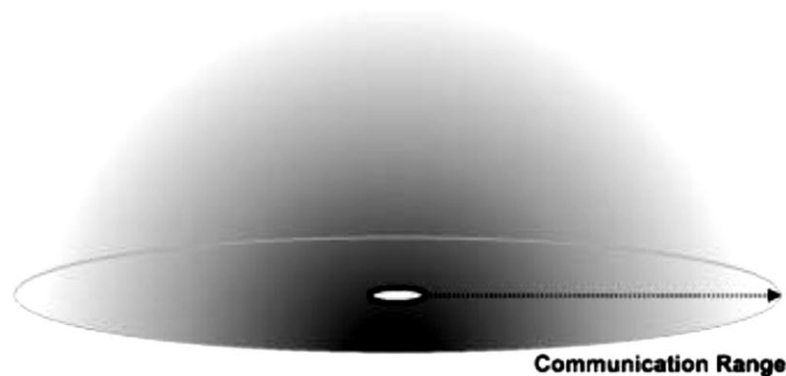


Рисунок 2.2. – Зменшення потужності сигналу

Втрати на шляху при розповсюдженні найкраще описуються моделлю втрат на шляху вільного розповсюдження. Модель втрат на шляху вільного розповсюдження припускає, що передавальна антенний пристрій є ізотропною, тобто, передавальний пристрій випромінює енергію з рівною інтенсивністю у всіх напрямках, і немає ніяких об'єктів на шляху розповсюдження між передавальним пристроєм і приймаючим пристроєм, які могли б блокувати сигнал або створювати умови для його відображення. Також передбачається, що середовище передачі не поглинає енергію [35, 36].

Потужність, прийнята приймальною антенним пристроєм в моделі вільного простору визначається за формулою Фрісса для вільного простору [4, 36]:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L}, \quad (2.1)$$

де  $P_t$  – передана потужність,  $P_r(d)$  – прийнята потужність, яка є функцією відстані між передавальним пристроєм і приймаючим пристроєм,  $G_t$  – посилення

передавальної антени,  $G_r$  – посилення приймальної антени,  $\lambda$  – довжина хвилі сигналу,  $d$  – це відстань між передавальний пристроєм і приймаючий пристроєм і  $L$  – коефіцієнт втрат системи, не пов'язаних з розповсюдженням [35, 36].

Можна бачити, що потужність прийнятого сигналу обернено пропорційна квадрату відстані між передавальною і приймальною антенний пристрійми. Отже, якщо відстань між передавальний пристроєм і приймаючий пристроєм збільшується, потужність сигналу, що приймається, зменшується. Рівняння 2.1 має змогу бути записано у такому вигляді [35, 36]:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \left(\frac{d_0}{d}\right)^2, \quad (2.2)$$

де  $d_0$  – гранична відстань для дальньої галузі антени. Втрати на шляху,  $PL(d)$  – це ослаблення сигналу між передавальною і приймальною антенний пристрійми і визначається як [36]:

$$PL(d) = \frac{P_t}{P_r(d)}, \quad (2.3)$$

$$PL(d) = \frac{(4\pi d)^2 L}{G_t G_r \lambda^2} \left(\frac{d_0}{d}\right)^2, \quad (2.4)$$

Цьому методу властивий ряд істотних обмежень, оскільки рівень сигналу є дуже мінливим параметром із – за впливу наступних чинників [36]:

- швидкі і повільні затухання сигналів на шляху за зміни умов поширення радіохвиль [36];
- багатопроменеве поширення, внаслідок віддзеркалень від різних металевих предметів [36];
- розкид вихідної потужності передавальний пристрійів і чутливості приймаючий пристроїв [35, 36];
- вплив орієнтації антен за нерівномірності діаграми спрямованості.

Також даний метод, як і інші, має певні переваги і недоліки. Основна перевага – низька ціна, тому що більшість одержувачів здатна до оцінки отриманої потужності сигналу [35, 36].

Недолік цього методу – те, що він дуже чутливий до спотворень і втручань, що призводить до значних похибок на оцінки відстані [5, 36].

Хоча RSSI показує деякі результати в моделюваннях і експериментах, його використання в реальних приладах не завжди виправдане. Але, розглядаючи його низьку ціну, використання даного методу має певні переваги. При використанні складних і точних пристроїв (як у випадку з, з кращими передавальний пристроями) RSSI є найбільш доступною технологією оцінки відстані з точки зору вартості/точність [35, 36].

### 2.1.2. Методи оцінювання відстані засобами безпроводних сенсорних приладових систем на основі часу прибуття сигналу

Різні методи намагаються оцінити відстань між двома вузловими пристроями, застосовуючи час, вимірюючи час поширення сигналу від передавальний пристрою до приймаючого пристрою так, щоб на його основі можна було розрахувати відстань між передавальний пристроєм і приймаючий пристроєм.

Найпростішим є *ToA – Time of Arrival* (Рисунок 2.3, а) [6, 7, 8]. В цьому випадку, відстань між двома вузловими пристроями прямо пропорційна часу, який використовується сигналом, щоб поширитися від одного пункту до іншого. Відстань між відправником і приймаючий пристроєм визначається за формулою [35, 37]:

$$d = S_r(t_2 - t_1),$$

де  $s_r$  - швидкість поширення радіосигналу (швидкість світла), і  $t_1$  і  $t_2$  – час, коли сигнал відіслано і отримано. Цей тип оцінки вимагає точно синхронізованих вузлових пристроїв, і час, коли сигнал залишає вузловий пристрій, має бути в пакеті, який посилають [9].

*TDofA (Time Difference of Arrival)* (Рисунок 2.3, б) заснований на відмінності часів коли єдиний сигнал від одного вузлового пристрою прибуває в три або більше вузлових пристроїв або різниці часу, коли кілька сигналів від одного вузлового пристрою надходять в інший вузловий пристрій.



Перший випадок, більш поширений в стільниковому зв'язку, вимагає точно синхронізованих вузлових пристроїв приймаючий пристрою (в цьому випадку, базові станції) [37, 45].

У другому випадку, більш поширеному і відповідному до БСПС, вузлові пристрої повинні бути обладнані додатковими апаратними засобами, здатними до відправлення двох типів сигналів одночасно. У цих сигналів повинні бути різні швидкості поширення, як радіо/ультразвук або радіо/акустичний. Зазвичай, перший сигнал – пакет безпосередньо, який із швидкістю світла ( $\sim 300,000 \text{ km/s}$ ), і другий сигнал – звуковий ( $\approx 340 \text{ m/s}$ ) [10, 37].

Метод TDoA використовується для обчислення координат БСПС, де ультразвуковий імпульс передається одночасно з радіосигналом.

В цьому випадку, вузлові пристрої вираховують різницю часу прибуття двох сигналів. Відстань має змогу тепер бути обчислена наступною формулою [35, 37]:

$$d = (S_r - S_s)(t_2 - t_1)$$

де  $s_r$  і  $s_s$  – швидкість поширення радіо та ультразвукового сигналу, і  $t_1$  і  $t_2$  – час прибуття радіо та ультразвукових сигналів, відповідно [35, 37].

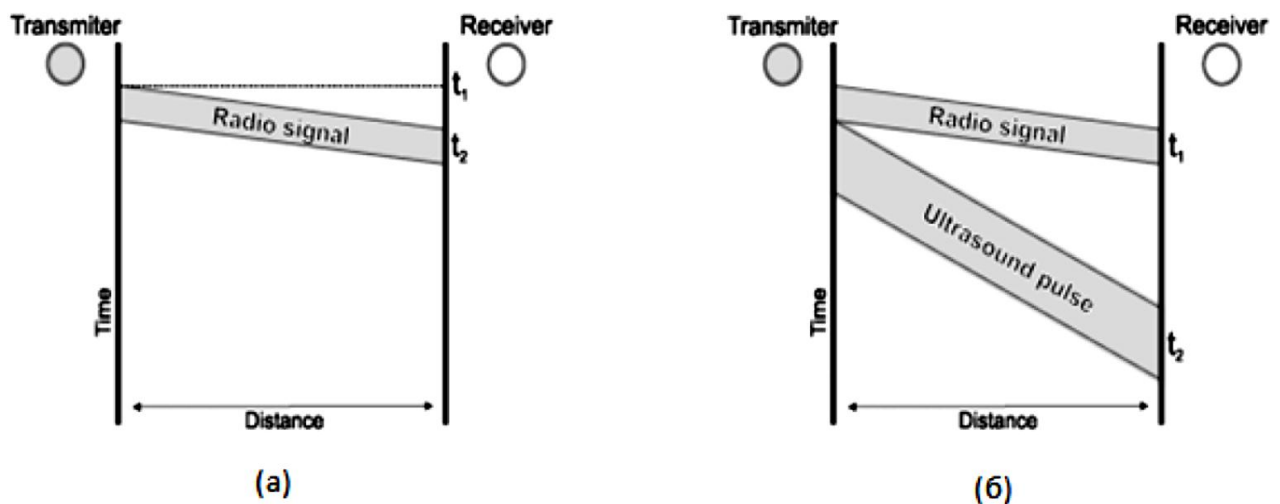


Рисунок 2.3. – Визначення відстаней за допомогою методів: а) TOA – (Time of Arrival); б) TDOA (Time Difference of Arrival)

Оцінка похибки на відстані, отримані *TDOA*, вимірюються, в сантиметрах. Експерименти з ультразвуком, показують похибки приблизно два або три сантиметри (менші ніж вузловий пристрій) [35, 37].

Незважаючи на більш низькі похибки, у цих методах є певні недоліки. Перший – потреба додаткових апаратних засобів щоб надсилати другий сигнал, який збільшує вартість вузлового пристрою. Другий – діапазон другого сигналу, який зазвичай менший – між 3 м. і 10 м. з більш потужними передавальний пристроями [11, 37].

### 2.1.3. Метод визначення координат на основі кута отриманого сигналу

**Визначення координат на основі кута отриманого сигналу (від англ. *Angle of Arrival, AOA*).** Координати мобільних вузлових пристроїв розраховуються за законами гоніометрії [12, 13]. За допомогою спрямованих антен або набору антен, мобільним вузлом вимірюються кути приходу сигналів від стаціонарних вузлових пристроїв, з відомими координатами (рис. 2.4). По виміряних напрямках обчислюється координати рухливого об'єкту. Точність цього підходу обмежена можливими згасаннями сигналу на вимірювальній апаратурі, так само через багатопроменеві відображення сигналу, які приходять з різних напрямів [35].

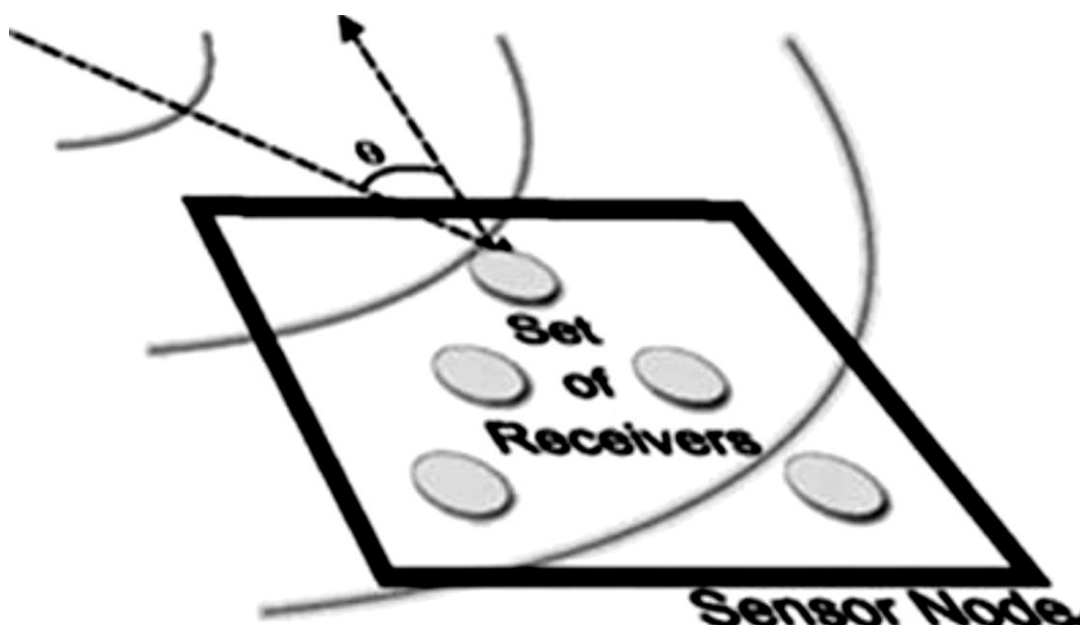


Рисунок 2.4. – Angle of Arrival

Експерименти показують, що цей метод має похибку в кілька градусів (близько 5) [11]. Недоліками цього методу є необхідність додаткового обладнання та необхідність мінімальної відстані між приймаючий пристроями [35].

В деяких випадках, інформацію для оцінки відстані є тільки дальність зв'язку вузлових пристроїв. Якщо вузловий пристрій отримує пакет даних з іншого вузлового пристрою, то відстань між цими вузловими пристроями між нулем і максимальною дальності зв'язку [35].

Як правило, методики, які використовують цей метод оцінки відстані не потребують точної відстані, а тільки інтервал. Щоб отримати тільки відстань (а не інтервал), ми має змогу вибрати одну точку з інтервалу, як в середній точці, як у випадку 3. В цьому випадку максимальна похибка цієї оцінки буде наполовину менша від дальності зв'язку. Цей метод визначення відстані має ту перевагу, що найпростіший і з найменшими витратами. Додаткового обладнання не потрібно, так само як і додаткових обчислень, необхідних для оцінки відстані [35].

З іншого боку, похибка розміром 50% від дальності зв'язку для кожної відстані, є не придатною для більшості систем локалізації. Візьмемо, як у випадку 3 дальність зв'язку до 100 метрів. У цьому випадку похибка цього методу має змогу бути близько 50 м [11].

Коли у вузлового пристрою є досить інформації про відстані або кути позицій, тоді можна визначити свою власну позицію, застосовуючи один з методів, які будуть розглянуті далі [35].

Декілька методів можуть використовуватися, щоб вирахувати позицію вузлового пристрою. Такі методи включають: трилатерацію, мультилатерацію, тріангуляцію [35].

Вибір, який метод використовувати, залежить від кінцевої продуктивності системи локалізації. Такий вибір залежить від доступної інформації і від обмежень процесора [35].

## 2.2. Методи обчислення позиції розташування засобами безпроводних сенсорних приладових систем

Щоб врахувати позицію вузлового пристрою, можуть застосовуватися декілька методів. Такі методи включають: трилатерацію, муьтилатерацію, тріангуляцію [35].

Такі методи включають: трилатерацію, муьтилатерацію, тріангуляцію.

Вибір, який метод використовувати, залежить від кінцевої продуктивності системи локалізації. Такий вибір залежить від доступної інформації і від обмежень процесора.

Математична постановка задачі визначення координат в БСПС буде мати наступний вигляд. Припустимо в деякій галузі простору  $S$  розміром  $S=A \times B$ , випадковим чином однорідно розподілені об'єкти БСПС  $\{i\}$ , де  $i \in M=[1 \dots M]$  рис. 2.5 [14, 15, 16].

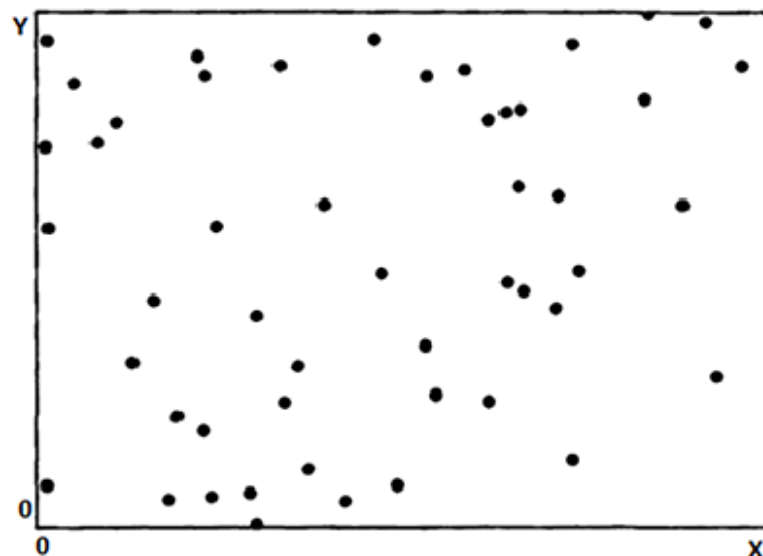


Рисунок 2.5. – Схема розташування вузлових пристроїв БСПС в просторі

Об'єкти мають радіо засоби, завдяки яким кожен об'єкт має змогу спілкуватися і визначати відстані  $d$  до найближчих "сусідів" (об'єкти з якими є зв'язок в радіусі  $L$ ), при цьому (виходячи із методу визначення відстаней) відома точність вимірів, що проводяться. Кожен об'єкт і збирає інформацію про відстані до усіх доступних "сусідів"  $j$  і заносить її в таблицю [18]

$$Ti=\{J,d_{ij}\}$$

Виходячи з цих даних потрібно визначити координати об'єктів  $\vec{r}_i$ . Іншими словами потрібно вирішити систему рівнянь

$$\vec{r}_i - \vec{r}_j = d_{ij},$$

де  $d_{ij}$  – виміряна відстань від  $i$  до  $j$ , як правило містить похибку вимірювання, яка описується розподілом яка описується розподілом [19]

$$F=(d_{ij}, \delta_{ij}),$$

де  $i,j=[1...M], i \neq j$ .

Як правило, в якості функції розподілу  $F$  використовується нормальний розподіл

$$N=(0, \delta_{ij})$$

при цьому дисперсія похибки виміру  $d$  визначається способом оцінки відстані, і має змогу бути оцінена апіорі теоретично, на основі імітаційного моделювання або з експерименту [35].

У двовимірному випадку

$$\vec{r}_i = |x_i y_i|^T$$

в тривимірному – відповідно

$$\vec{r}_i = |x_i y_i z_i|^T.$$

Для зручності всіх наступних викладок вданійроботі передбачається двовимірний випадок (БСПС розгорнута на плоскій поверхні) – це допущення не впливає на спільність міркувань, що приводяться, але спрощує теоретичний розгляд і подальшу практичну реалізацію алгоритмів визначення координат [35].

Вимір відстаней в свою чергу яка правило здійснюється або на основі часу розповсюдження сигналу від передавальний пристрою до приймаючий пристрою (TimeofArrival - ToA), або на основі оцінки рівня прийнятого сигналу (ReceivedSignalStrengthIndicator–RSSI). При дослідженні БСПС було встановлено, що алгоритм ToA дає меншу похибку в вимірі відстані, але оскільки приймаючий пристрійі стандарту ZigBee підтримують метод RSSI апаратно, то

він є більш доцільний в використанні. Вирішення поставленої задачі можна шукати 2-ма способами: перший полягає в зведенні розглянутої нелінійної задачі якимось чином до лінійної, другий – вирішення нелінійної задачі, як у випадку з [35]:

$$f = \sum_i f_i = \sum_i \sum_j (\left| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right| - d_{ij})^2 \quad (2.5)$$

Алгоритм вирішення даної задачі окрім алгоритма визначення координат залежить й від інших факторів, зокрема [31]:

1. Однорідність розподілення об'єктів всередині БСПС
2. Щільність розподілу об'єктів БСПС
3. Точність виміру відстаней

Для оцінки якості роботи алгоритму і оцінки результатів можна використовувати критерії, зокрема:

1. Процентне співвідношення числа об'єктів, координати яких вдалося визначити до загального числа об'єктів залежно від щільності БСПС і точності вимірювання відстаней
2. Середньоквадратичне відхилення оцінок відстаней, отриманих в результаті роботи алгоритму визначення координат від відповідних оцінок відстаней, отриманих на основі RSSI (2.5).
3. Відхилення оцінок відстаней, отриманих в процесі роботи БСПС від результатів роботи алгоритму визначення координат [35]

$$\max \left| \left| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right| - d_{ij} \right|$$

Самий очевидний спосіб вирішення поставленого завдання – це оснащення всіх об'єктів БСПС модулями зовнішньої радіонавігаційної системи (GPS, ГЛОНАСС). Проте стосовно до даної задачі таке рішення має ряд таких же недоліків: вартість модулів, їх розміри, високе енергоспоживання тощо [35].

Одним з найпоширеніших підходів до вирішення завдання пошуку координат на основі інформації, зібраної в процесі роботи БСПС, є система APS.

APS являє собою набір алгоритмів визначення координат в сенсорній БСПС, при цьому кожний об'єкт шукає свої координати самостійно. Передбачається, що невелика частина об'єктів (орієнтири) здатна визначити свої координати на основі інформації ззовні (за допомогою наземної або супутникової навігаційної системи) [35].

Система APS складається з наступних алгоритмів: DV-hop, Алгоритм «DV-hop» становить собою послідовність наступних дій:

1. Кожний об'єкт намагається оцінити відстань до орієнтирів в числі «кроків» (проміжних об'єктів) і заносить ці дані до таблиці  $\{\vec{r}_i, h_i\}$ , де  $\vec{r}_i$  – координата орієнтира  $i$ ,  $h_i$  – число кроків до  $i$ . Після чого вони обмінюються отриманими даними з найближчими сусідами і підтримують інформацію в таблиці в актуальному стані [35].

2. Після того як кожний орієнтир забрав достатній об'єм даних, відбувається оцінка середньої довжини одного «кроку» [32]:

$$c_i = \frac{\sum_j \left| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right|}{\sum_k h_k}$$

Далі розраховується значення  $C = \overline{c_i}$  усереднювання по всій БСПС і передається всім об'єктам. В подальшому ця величина періодично оновлюється і підтримується в актуальному положенні [35].

3. Коли об'єкт має відстань в «кроках» до декількох орієнтирів і середня довжина одного кроку, він в змозі оцінити відстані до декількох орієнтирів в одиницях довжини і вирахувати свої координати на основі існуючих даних. Даний алгоритм краще всього працює в однорідних БСПС, де відстані між об'єктами приблизно однакові. В іншому випадку цей алгоритм в результаті усереднювання дозволяє отримати лише грубі оцінки координат [35].

**Алгоритм «ABC»** полягає в тому, що якщо серед сусідів  $i$  є три об'єкти з відомими координатами, то на основі цієї інформації можна записати систему рівнянь [35]:

$$\left\{ \left| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right| - d_{ij} \right\}$$

яка вирішується відносно невідомої змінної  $\vec{r}_i$ . Після цього  $\vec{r}_i$  служить джерелом інформації для інших об'єктів. Якщо кількість орієнтирів в околиці  $i$  більше, то можна знайти рішення, що приводить до мінімуму [35]

$$\sum_{i < j} \left| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right| - \hat{d}_{ij}$$

Даний алгоритм працює при відсутності помилок виміру відстаней і в тих випадках, коли об'єкти розподілені рівномірно і з достатньою щільністю.

**Алгоритм «MDS-MAP»** полягає в послідовності дій [33]:

1. Для кожної пари об'єктів оцінюється найкоротша відстань один до одної. Коли об'єкти є безпосередніми сусідами один одного, цією оцінкою є безпосередній вимір відстані. В інших випадках в якості оцінки приймається найкоротший шлях (одержаний, як у випадку 3, на основі алгоритму Дейкстри). В результаті будується матриця виду [34]:

$$A = \begin{bmatrix} \hat{d}_{11} & \cdots & \hat{d}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{d}_{M1} & \cdots & \hat{d}_{MM} \end{bmatrix}$$

Головна діагональ матриці  $A$  – нульова.

2. Після того як побудовано матрицю  $A$  пошук координат окремих об'єктів  $\vec{r}_i, j = [1, \dots, M]$  йде за допомогою рішення задачі багатомірної оптимізації функціоналу [35]:

$$f = \sum_{i < j} \left( \left| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right| - \hat{d}_{ij} \right)^2,$$



3. Отримане рішення є інваріантним відносно перетворення системи координат, тому потребує перетворення до глобальних координат. Для цього потрібно 3-4 об'єкти з невідомими координатами.

Даний алгоритм має особливості, які необхідно зазначити:

1. Централізоване визначення координат
2. Потреба в наявності базової станції в БСПС

3. Алгоритм MDS пропонує найкращу оцінку координат об'єктів внаслідок того, що він використовує всі дані БСПС. Отже, він має змогу бути еталоном в порівнянні з іншими алгоритмами, але його реалізація має складнощі.

Отже, приведені алгоритми мають ряд особливостей:

1. Оснащення частки об'єктів датчиками системи глобального позиціонування [35]
2. Необхідність проведення великого об'єму обчислень для вирішення оптимізаційних задач для визначення координат
3. Використання об'єктом даних про координати інших об'єктів, які не є безпосередніми сусідами

Указані особливості та вищенаведені алгоритми дозволяють сформулювати основні вимоги до радіонавігаційної системи, призначеної для використання в БСПС.

1. Децентралізоване визначення координат, коли кожний об'єкт БСПС визначає свої координати самостійно
2. Використання лише системної інформації БСПС, відсутність додаткового оснащення у вигляді GPS-датчиків

**Вирішення поставленої задачі за допомогою розробленого методу і алгоритму визначення координат об'єктів БСПС**

Запропонований метод визначення координат об'єктів полягає в тому, що в процесі роботи БСПС кожний об'єкт до кожного відправленого повідомлення додає дані про своє місцезнаходження (якщо вони відомі з достатньою точністю) і всі ближні сусіди, які отримують це повідомлення використовують інфо-

рмацию і оцінку відстані до передавальний пристрою для отримання і уточнення даних про свої координати. Таким чином в методі використовується лише та інформація, яка отримана об'єктом БСПС в процесі роботи самостійно від безпосередньо ближніх сусідів. В цілому метод визначення координат можна поділити на 3 етапи [35]:

1. Сбір даних
2. Визначення координат
3. Уточнення координат

**Сбір даних** передбачає накоплення інформації про координати та про відстані до ближніх сусідів в таблицях  $T_i$  наступного вигляду:

$$T_i = \{ \{ \vec{r}_a, p_a, d_a \}, \{ \vec{r}_b, p_b, d_b \}, \dots \},$$

де  $a, b \dots M_i$  – ідентифікатори об'єктів, що знаходяться в радіусі  $L$  до  $i$ .

**Алгоритм збору даних.** Швидкість заповнення таблиці  $T_i$  і кількість елементів в ній залежить від кількості ближніх сусідів, які можуть визначити свої координати самостійно, тобто [35]:

$$Q_i = M_i \cap Q,$$

де  $Q$  – процентне відношення об'єктів в мережі, які в змозі визначити свої координати самостійно.

При цьому елементи матриць  $p_b, d_b, \dots; \sigma_{jk} \equiv 0$ , оцінка відстаней  $d$  містить похибки вимірювань з відомими другими центральними моментами  $\sigma_d$ . При отриманні об'єктом  $i$  декількох повідомлень від об'єкту  $a$  з невеликим інтервалом за часом в розпорядженні  $i$  виявляється декілька відліків:

$$\{ \vec{r}_{a1}, p_{a1}, d_{a1} \}, \{ \vec{r}_{a2}, p_{a2}, d_{a2} \} \dots,$$

де оцінки координат  $\{ \vec{r}_a, p_a \}$  – однакові, а оцінки відстаней  $d_a$  можуть бути різними. Тим не менш з набору  $d_{a1}, d_{a2} \dots$  не має змогу бути отримана більш точна оцінка  $d_a$ , оскільки дані величини не є статистично незалежними [35].

Якщо в процесі роботи виявляється, що  $T_i > 3$  і в таблиці присутні дані про трьох сусідів, що не знаходяться на одній прямій  $\{ \{ \vec{r}_a, p_a \}, \{ \vec{r}_b, p_b \}, \{ \vec{r}_c, p_c \} \}$ , то

ці дані можуть бути використані для отримання власної оцінки  $\{\vec{r}, p\}$ . По закінченню цієї процедури використані дані з таблиці вилучаються. Одержаний результат має змогу бути переданий в якості вихідних даних для розрахунку і уточнення координат.

**Визначення координат.** Для оцінки координат треба вирішити систему з декількох рівнянь виду:

$$\left\{ \left| \vec{r} - \vec{r}_j \right| - d_j \right\}.$$

**Алгоритм визначення координат.** Лінійна система рівнянь при  $k > 3$  надлишкова, тому треба знайти таке рішення  $\vec{r}_0$  таке, при якому різниця між лівими та правими частинами системи рівнянь була мінімальна, тобто:

$$f(\vec{r}) = \sum_j f(\vec{r}) = \sum_j \left( \left| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right| - d_{ij} \right)^2 < f(\vec{r}_0), \quad \forall \vec{r}' \neq \vec{r}_0: f(\vec{r}') < f(\vec{r}_0)$$

Після піднесення до квадрату цих частин:

$$|\vec{r}|^2 + |\vec{r}_j|^2 - 2(\vec{r}, \vec{r}_j) = d_j^2$$

З  $k$  квадратних рівнянь можна отримати  $(k-1)$  лінійних відніманням першого рівняння з всіх інших:

$$|\vec{r}_j|^2 - |\vec{r}_1|^2 - 2(\vec{r}, \vec{r}_j - \vec{r}_1) = d_j^2 - d_1^2$$

Враховуючи асоціативність скалярного добутку векторів і переносючи всі відомі доданки в праву частину отримаємо:

$$2(\vec{r}_j - \vec{r}_1)^T (\vec{r}) = (|\vec{r}_j|^2 - |\vec{r}_1|^2) - (d_j^2 - d_1^2)$$

Введемо позначення:

$$A_j = 2(\vec{r}_j - \vec{r}_1)^T, B_j = (|\vec{r}_j|^2 - |\vec{r}_1|^2) - (d_j^2 - d_1^2)$$

Рівняння (11) приймає вигляд:

$$A_j(\vec{r}) = B_j$$

Після введення матричних позначень:  $A = |A_2, \dots, A_{k-1}|^T, B = |B_2, \dots, B_{k-1}|^T$ , виходить лінійна система вигляду:

$$A\vec{r} = B$$

Вирішення заданої системи, що задовольняє умовам (9)-(10) існує при умові, що ранг матриці  $A$  перевищує розмірність  $\vec{r}$  і при цьому це виражається наступним співвідношенням:

$$\vec{r}' = (A^T A^{-1}) A^T B$$

Подана величина  $\vec{r}' = \vec{f}'(\{\vec{r}_j, p_j, d_j\})$ ,  $j \in [1, \dots, k]$  буде становити оптимальну оцінку координат, отриману на основі зібраної інформації.

Точність величини (15) описується діагональною коваріаційною матрицею з елементами [35]:

$$\sigma^2 = \max \left\{ \frac{1}{\sin \widehat{\vec{r}_i \vec{r}_j}} \sigma_i^2 + \sigma_j^2 \right\}$$

**Уточнення координат.** Розглянемо ситуацію, коли на основі декількох вимірів вже зроблена оцінка координат  $\vec{r}$ , точність якої описується матрицею  $p^0$ . Припустимо, що із накопиченням відстаней до сусідів з відомими координатами аналогічним чином, але на основі нових вихідних даних з часом з'являються нові оцінки:

$$\vec{r}, \vec{r}^2, \vec{r}^n,$$

точність яких описується коваріаційними матрицями:

$$p^0, p^1, \dots, p^n$$

відповідно. В такій ситуації бажано мати в кожний момент часу загальну інтегральну оцінку координат  $\vec{r}^n$  і відповідну їй точність в вигляді коваріаційної матриці  $p^n$

$$\vec{r}^n = f(n, \vec{r}^0, p^0, \dots, \vec{r}^n, p^n)$$

$$p^n = g(n, \vec{r}^0, p^0, \dots, \vec{r}^n, p^n)$$

**Алгоритм визначення координат.** Зберігання і використання для отримання чергової оцінки всієї сукупності точок при використанні в умовах обмежених обчислювальних ресурсів не є доцільним. В такій ситуації найбільш зручні і практичні процедури рекурентної оцінки, в якій в кожний момент часу в пам'яті об'єкта зберігається поточна інтегральна оцінка координат  $\{\vec{r}, p\}$  і для

отримання наступної оцінки до наявної інформації  $\{\vec{r}, p\}$  додається чергове зміна  $\{\vec{r}, p\}$ :

$$\begin{aligned}\vec{r}^n &= f(n, \vec{r}^{n-1}, p^{n-1}, \dots, \vec{r}^n, p^n) \\ p^n &= g(n, \vec{r}^{n-1}, p^{n-1}, \dots, \vec{r}^n, p^n)\end{aligned}$$

Де для обчислення  $f$  і  $g$  вже треба значно менша кількість операцій ніж у випадку (17). З цією метою використовується процедура калмановської фільтрації [35].

Оцінку точності доцільно почати з аналізу рівнянь(7), яка містить рівняння другого степеню, отже вона має два розв'язки  $\vec{r}_{1,2}$ . Точність цих розв'язків виражається коваріаційними матрицями  $p_{1,2}$ . Для прийняття відповідного рішення треба оцінити наступні ймовірності:

$$\begin{aligned}P_1 &= P(\vec{r}_1, \vec{r}^{n-1}) \\ P_2 &= P(\vec{r}_2, \vec{r}^{n-1})\end{aligned}$$

При такій ситуації задається функція вартості помилки й вибір правильного рішення виходить із співвідношення  $\frac{p_i}{p_{3-1}} > \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  – порогова величина  $\varepsilon \gg 1$ . Якщо жодне зі значень  $i$  не задовольняє критерію, то обидві гіпотези можуть бути відкинуті, або має змогу продовжувати з'являтися додаткова інформація (оцінок відстаней і координат) [35].

Потрібно ввести деякі терміни які можуть бути використані, щоб визначати поточний стан вузлового пристрою [19].

*Визначення 1.* Невідомі вузлові пристрої –  $U$ . Також відомі, як невизначені або німі вузлові пристрої, невідомі вузлові пристрої відносяться до вузлових пристроїв БСПС, які не знають інформацію про їх локалізацію. Дати цим вузлового пристроєм можливість оцінювати свою позицію – основна мета систем локалізації [35].

*Визначення 2.* Визначені вузлові пристрої –  $S$ . Ці вузлові пристрої були спочатку невідомими вузловими пристроями, але зуміли оцінити свої позиції, застосовуючи систему локалізації. Число визначених вузлових пристроїв і пе-

редбачувана похибка визначення позиції цих вузлових пристроїв – основні параметри якості системи локалізації [35].

*Визначення 3.* Якірні вузлові пристрої –  $B$ . Також відомі як орієнтири або прив'язки, це – вузлові пристрої, які не потребують системи локалізації, щоб оцінити їх фізичні позиції. Їх локалізація отримана ручним розміщенням або зовнішніми засобами, такими як універсальна система. Ці вузлові пристрої формують ядро систем локалізації для більшості БСПС [35].

*Визначення 4.* Вузлові пристрої додаткової інформації. Це вузлові пристрої, в яких інформація локалізації використовуватиметься невідомим вузлом, щоб оцінити його місце розташування. Вузловий пристрій додаткової інформації має також бути якорем або визначеним вузлом [35].

Проблема локалізації має змогу бути спрощена і визначена за наступним визначенням:

*Визначення 5.* Проблема локалізації. Враховуючи декілька переходів БСПС, і набір якірних вузлових пристроїв  $B$  та їх позиції  $(x_b, y_b)$  для всіх  $b \in B$ , потрібно знати позицію розташування невідомого вузлового пристрою  $U$   $(x_u, y_u)$  також для всіх  $u \in U$ , перетворюючи ці *невідомі* вузлові пристрої у визначені вузлові пристрої  $S$  [35].

Положення вузлових пристроїв не повинні бути розроблені і визначені. Це дозволяє випадкове розгортання БСПС в недоступних місцях аби, як у випадку з, допомоги запобігання лиха (пожежі). Таким чином, системі локалізації потрібно надати інформацію про позиції вузлових пристроїв. Важливість інформації локалізації є результатом декількох коефіцієнтів. Деякі з цих коефіцієнтів включають [35]:

- ідентифікація даних: полягає у відображенні подій відносно їх місця розташування. Одна з основних цілей БСПС полягає в тому, щоб контролювати область, що представляє інтерес. Проте, як тільки дані зібрані, стає важливо ідентифікувати область, якій належать ці дані [35];

- кореляція даних: дозволяє проміжним вузловим пристроєм корелювати і виконувати інформаційний сплав даних, зібраних у тій же самій галузі, тоді як ці дані відправлені через БСПС [19, 20];
- адресація вузлових пристроїв: відноситься до можливості використання фізичного розташування вузлових пристроїв, які мають унікальну ідентифікацію в БСПС [21];
- управління БСПС: дозволяє управляти запитом вузлових пристроїв локалізованих в певному регіоні, оцінки охоплення вузлових пристроїв [22];
- географічні алгоритми: Це – алгоритми, які використовують інформацію локалізації - вузлових пристроїв, щоб оптимізувати використання ресурсів БСПС. Деякі з цих алгоритмів включають маршрутизацію, управління щільністю БСПС [17].

Також потрібно виділити основні вимоги системи локалізації, які необхідні для побудови БСПС:

- самоорганізація, яка незалежна від будь-якої інфраструктури;
- масштабованість, де алгоритми можуть бути застосованими до великомасштабних і/або щільних БСПС;
- надійність, складається з допуску до проблем комунікації і також до неточної відстані і інформації позиції;
- ефективність при використанні ресурсів БСПС, тому що навіть, будучи необхідною для більшості БСМ, система локалізації не основна мета цих БСПС [35].

#### 2.2.1. Метод трилатерації

**Трилатерація** – основний та найпростіший метод. Цей метод обчислює позицію вузловим пристроєм перетином трьох кругів, як зображено на рисунку 2.6. Щоб оцінити його позицію, застосовуючи трилатерацію, вузловий пристрій повинен знати положення трьох довідкових вузлових пристроїв і відстані до кожного з цих вузлових пристроїв. Відстані можуть бути обчислені, застосовуючи один з вищерозглянутих методів [35].

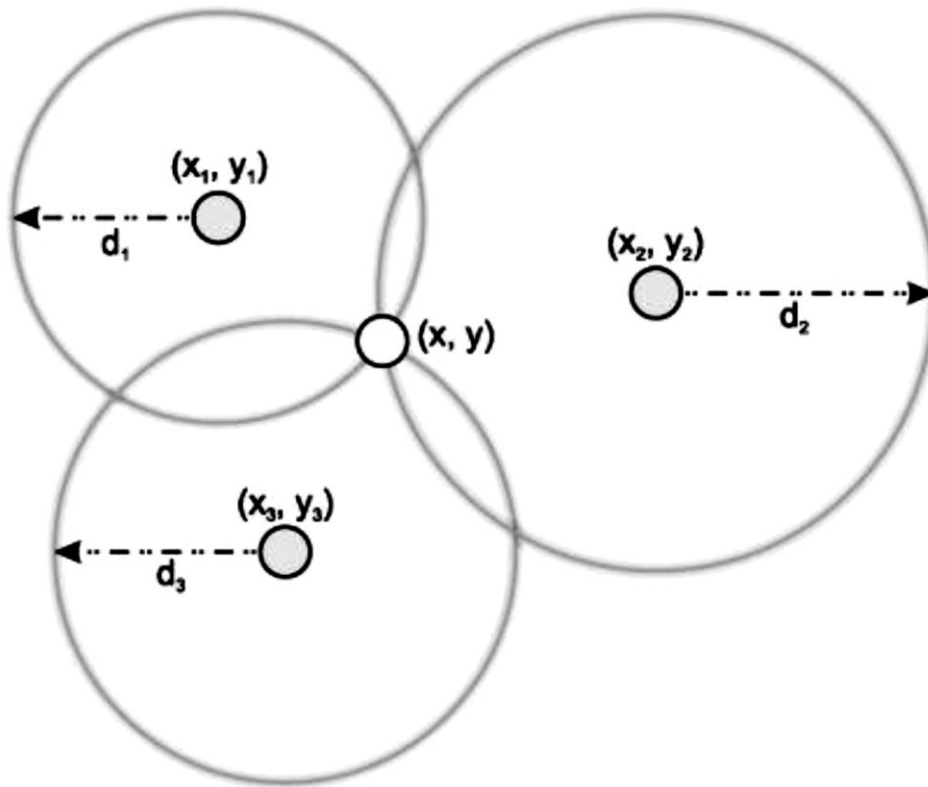


Рисунок 2.6. – Теоретична модель трилатерації

Кола, які сформовані положенням і відстанню до кожної точки виражаються за формулою:

$$(\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 = d_1^2$$

$$(\hat{x} - x_2)^2 + (\hat{y} - y_2)^2 = d_2^2$$

$$(\hat{x} - x_3)^2 + (\hat{y} - y_3)^2 = d_3^2$$

де  $(\hat{x}, \hat{y})$  – позиція яку потрібно знайти,  $(x_i, y_i)$  – позиція якірних вузлових пристроїв,  $d_i$  та – відстань якірного вузлового пристрою до невідомого вузлового пристрою. В цьому випадку, у нас є три квадратичні рівняння з двома невідомими, які можуть бути вирішені, теоретично [35].

У практичному застосуванні важко оцінити відстані і точну інформацію про розташування довідкових вузлових пристроїв, щоб обчислити координати.

Як зображено на рисунку 2.7.а, кола не перетинаються лише в одній точці, що призводить до нескінченного набору можливих рішень.



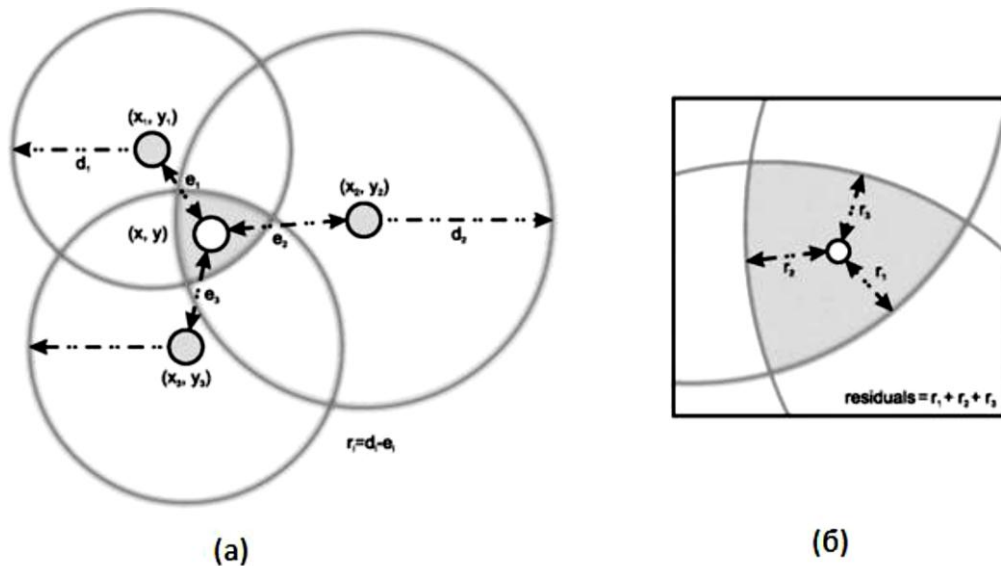


Рисунок 2.7. – Практична модель трилатерації: а) невідповідність позицій і відстаней генерують систему з нескінченними рішеннями; б) залишкове значення, як сума квадратів різниць між передбачуваними і обчисленими відстанями

Крім того, коли доступно більше трьох вузлових пристроїв з відомими координатами, ми маємо змогу використати метод мултилатерації, щоб обчислити положення вузлового пристрою. Тоді невизначена система рівнянь, де число рівнянь більше (за рахунок збільшення числа якірних вузлових пристроїв), кількість невідомих має бути вирішена. На рисунку 2.8 зображений цей випадок. Зазвичай, у таких систем не має унікального вирішення [35].

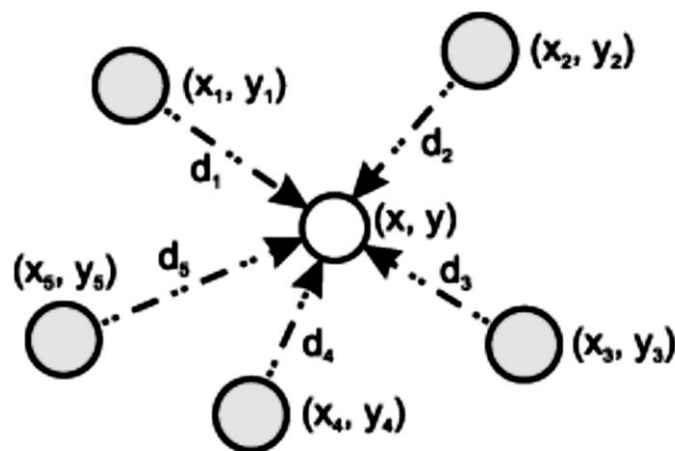


Рисунок 2. 8. – Модель мултилатерації, застосовується тільки тоді коли використовується більше ніж три якірні вузлові пристрої

Розглянувши  $n$  якірних вузлових пристроїв і похибку оцінки відстані, яка складає  $d_i = \hat{d}_i - \epsilon$ , система рівнянь виглядатиме наступним чином [35]:

$$\begin{aligned} (\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 &= \hat{d}_1^2 - \epsilon \\ &\vdots \\ (\hat{x} - x_n)^2 + (\hat{y} - y_n)^2 &= \hat{d}_n^2 - \epsilon \end{aligned}$$

де,  $\epsilon$  - зазвичай вважається незалежна нормальна випадкова величина.

Враховуючи останню рівність, систему рівнянь можна спростити до лінійної,  $Ax \approx b$ , або:

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \approx \\ &\approx \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_1^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Ця лінійна система має змогу бути розв'язана, застосовуючи стандартні методи як підхід найменших квадратів. Це має змогу бути зроблено наступним чином:

$$x = (A^T A)^{-1} (A^T b)$$

Основна ідея цього методу полягає в мінімізації суми квадратів різниці між розрахунками (як у випадку 3, за допомогою RSSI) і обчислені відстані (за оцінками, положення). Сума відмінностей відома як залишки, як показано на рисунку 2.7,б [35].

Математично записується так:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \min \left( \sum_{i=1}^n (\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} - d_i)^2 \right),$$

де  $(x_i, y_i)$  позиція опорного вузлового пристрою,  $d_i$  - оцінка відстані,

$$\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} - d_i$$

відстань між обчисленою позицією і позицією опорного вузлового пристрою, який є обчисленим відстанню.

Необхідно обчислити декілька операцій з плаваючою комою в залежності від методу який вираховує положення, що використовується для вирішення

системи рівнянь. У випадку методу найменших квадратів  $(m + \frac{n}{3})n^2$ , операцій з плаваючою комою (де  $m$  – кількість невідомих і  $n$  – кількість рівнянь) необхідних для визначення позиції [13, 35].

### 2.2.2. Метод тріангуляції

**В методі тріангуляція**, використовується інформація кутів замість відстаней. Обчислення позиції має змогу бути зроблене віддалено або вузловим пристроєм безпосередньо. У обох випадках позиція обчислюється з використанням тригонометрії – законам синусів і косинусів [35].

У першому випадку, віддаленого визначення позиції, зображено на рисунку 2.9.а принаймні два опорні вузлові пристрої оцінюють кут прибуття і віддалено обчислюють положення невідомого вузлового пристрою як місце, де лінії кутів від кожного опорного вузлового пристрою перетинаються. Цей тип тріангуляції в основному використовується у стільникових зв'язках [11].

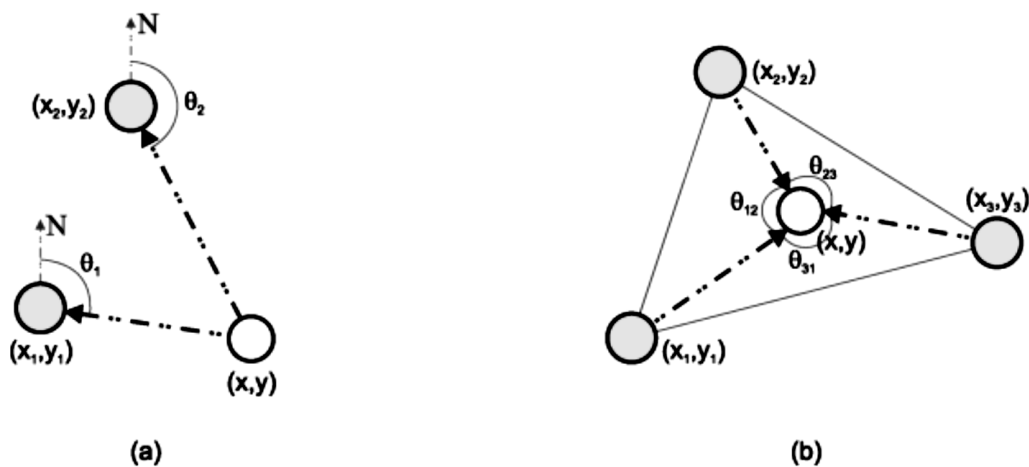


Рисунок 2.9. – Тріангуляція: а) двома якірними вузловими пристроями; б) трьома якірними вузловими пристроями

Але для БСПС, найважливіше – те, що сам вузловий пристрій обчислює свою власну позицію, тому для цього необхідно мати принаймні три вузлові пристрої з відомими координатами (рисунки 2.9.б). Невідомий вузловий пристрій оцінює свій кут до кожного з трьох опорних вузлових пристроїв, заснований на цих кутах і на позиціях опорних вузлових пристроїв (які формують три-

кутник), обчислює свою власну позицію, застосовуючи прості тригонометричні співвідношення [23]. Цей метод подібний до методу трилатерації [35].

### 2.2.3. Метод імовірнісних підходів

Невизначеність на відстані призвела до появи **методу імовірнісних підходів** для обчислення позиції вузлового пристрою. У імовірнісному підході обчислення позиції не зводиться до одного єдиного пункту, як в інших випадках, але у ряді пунктів є вірогідності того, щоб це буде реальна позиція невідомого вузлового пристрою [35].

Оцінка відстані імовірнісного підходу змодельована як нормальна випадкова змінна. Коли невідомий вузловий пристрій отримує пакет від опорного вузлового пристрою, це має змогу бути у будь – якому місці навколо опорного вузлового пристрою з імовірністю як зображено на рисунку 2.8.а. Коли інший пакет одержаний від іншого опорного вузлового пристрою, невідомий вузловий пристрій обчислює свою позицію знову як зображено на рисунку 2.8.б. Коли нова інформація розташування інших вузлових пристроїв отримана, тоді стає можливим ідентифікувати імовірне місце розташування невідомого вузлового пристрою, як зображено на рисунку 2.8.в [35].

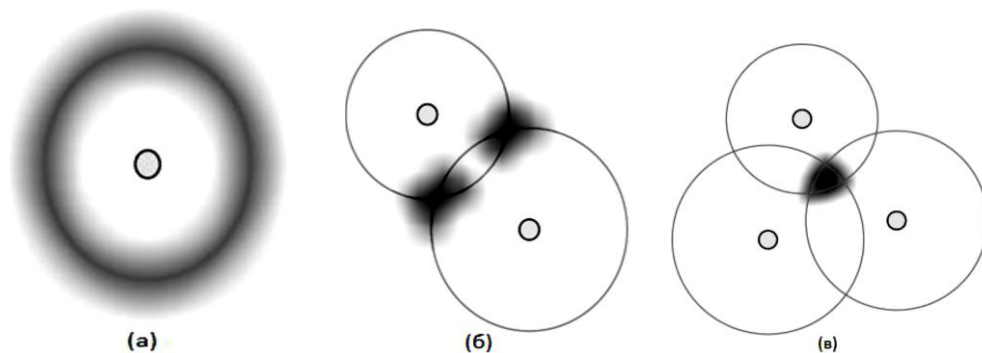


Рисунок 2.10. – Імовірнісний підхід

Основна проблема цього підходу – висока обчислювальна потужність і простір пам'яті. Дослідження цього методу показують, що, якби ми розглядали типовий розмір як матрицю  $d \times d$ , складність цього методу була б  $O(3d^2)$ .

Вся суть роботи цього( методу полягає в передаванні зібраної інформації до центрального вузлового пристрою, на якому проводяться обчислення позицій [24, 25].

#### 2.2.4. Метод обмеження квадрату

**Метод обмеження квадрату (Bounding Box)**, використовує квадрати – замість кругів, які використовуються як у випадку з в методі трилатерації, – обмежуючи можливі положення вузлового пристрою. Приклад цього методу зображений рис.2.11 [26].

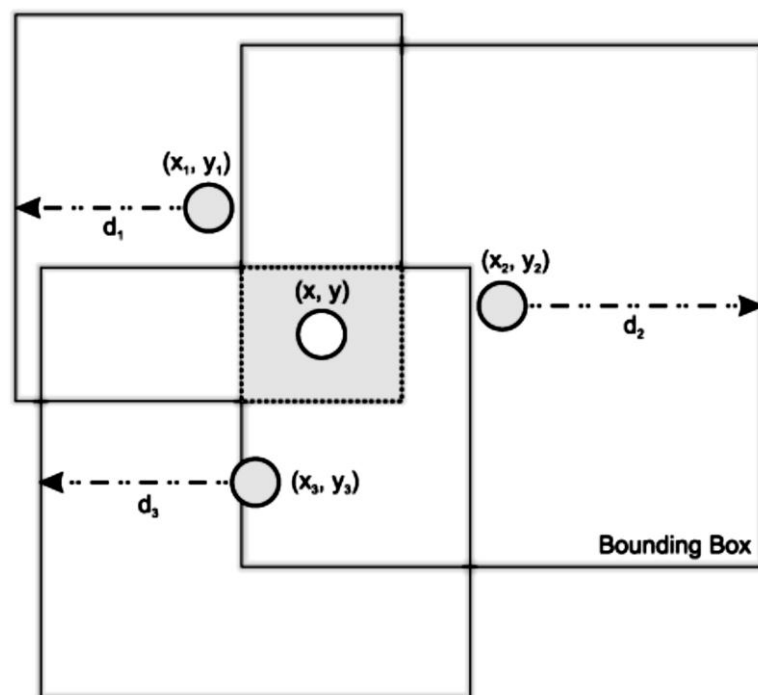


Рисунок 2.11. – Метод Bounding Box

Незважаючи на похибку цього методу при завершенні обчислення, яка більша, ніж у методі трилатерації, але значно менша кількість ресурсів процесора використовується для обчислення перетину квадратів, ніж обчислення перетину кіл [35].

Відповідно до припущення, що найвірогідніше розміщення вузлового пристрою – центральна точка серед усіх опорних вузлових пристроїв, ми маємо змогу обчислити позицію невідомого вузлового пристрою без потреби

оцінки відстаней або кутів, але тільки при використанні методу на основі дальності сигналу [35].

Для кожного  $i$  опорного вузлового пристрою, обмежуючий квадрат, визначений як квадрат з центром у позиції цього вузлового пристрою  $(x_i, y_i)$ , із сторонами розміру  $2d_i$  (де  $d$  – передбачувана відстань), з координатами:

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \text{ та } (x_i + d_i, y_i + d_i)$$

Перетин усіх обмежуючих квадратів має змогу бути обчислений без потреби обчислень з плаваючою комою, беручи максимально низькі і мінімально високі координати усіх зв'язуючих квадратів [35]:

$$\begin{aligned} &(\max(x_i - d_i), \max(y_i - d_i)) \text{ та} \\ &(\min(x_i + d_i), \min(y_i + d_i)) \end{aligned}$$

Отримуємо заштрихований прямокутник який можна побачити на рисунку 2.11. Позиція невідомого вузлового пристрою потім обчислюється як центр перетину усіх зв'язуючих квадратів [35]:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left( \frac{\max(x_i - d_i) + \min(x_i + d_i)}{2}, \frac{\max(y_i - d_i) + \min(y_i + d_i)}{2} \right).$$

В цьому випадку, позиція вузлового пристрою обчислена при використанні наступного рівняння [27]:  $(\hat{x}, \hat{y}) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right)$  де  $n$  – кількість опорних вузлових пристроїв.

Цей метод є найбільш простим з точки зору обчислювальних ресурсів та необхідної інформації. Тільки операції з плаваючою комою (де  $n$  – кількість опорних вузлових пристроїв), обов'язкові для обчислення позиції. З іншого боку, отримані рішення не точні, головне щоб кількість опорних вузлових пристроїв була невеликою [35].

### **2.3. Алгоритми локалізації вузлових пристроїв безпроводних сенсорних приладових систем**

**Алгоритм локалізації** – головний компонент системи локалізації. Цей компонент визначає, яким чином будуть використовувати інформацію про відс-

тані та положення об'єктів, щоб обчислити розташування вузлових пристроїв БСПС із найменшими похибками [35].

Алгоритми локалізації класифікуються по таких категоріях:

- розподілені чи централізовані (Distributed or Centralized) Розташування вузлових пристроїв можуть бути обчислені розподіленим способом вузловими пристроями БСПС (само позиціонування), або єдиним центральним вузловим пристроєм (як у випадку з, більш потужнішим вузлом – маршрутизатором) [11].

- з або без інфраструктури. Якщо немає ніякої потреби в інфраструктурі чи якщо є потреба перепроєктувати попередню інфраструктуру, щоб дозволити функціонування алгоритму локалізації (як у випадку з, ручне розміщення якірних вузлових пристроїв) [23].

- відносне або абсолютне розташування. Обчислені позиції можуть бути мають зв'язок з глобальними координатами (як у випадку з, широта, довгота), або мають зв'язок з вузловим пристроєм або пунктом БСПС [28].

- внутрішня або зовнішня локалізація. Якщо система більше пристосована для закритого приміщення або для відкритої місцевості

One Hop або Multi Hop. Якщо всі невідомі вузлові пристрої мають прямий зв'язок з опорними вузловими пристроями або необхідно здійснити декілька переходів по БСПС [29].

Для оцінки продуктивності використовують наступні визначення:

- вартість зв'язку. Визначає складність алгоритму з точки зору обміну пакетами. Він також визначає вартість локалізації системи в сенсорної БСПС [35]

- кількість визначених вузлових пристроїв. Визначає відсоток вузлових пристроїв БСПС, які змогли обчислити свої позиції в кінці локалізації алгоритму. В ідеалі потрібно, щоб всі вузлові пристрої в змозі розрахувати свої позиції, але в багатьох випадках це не можливо

- кількість якірних вузлових пристроїв. Визначає кількість якірних вузлових пристроїв для роботи алгоритму локалізації. Якірні вузлові пристрої, як правило, дорожчі, ніж звичайні вузлові пристрої, і їх використання повинно бути зведене до мінімуму [35].

- Деякі характеристики БСПС можуть торкнутися продуктивності алгоритму локалізації. Важливо зробити експерименти для кожної запропонованої системи локалізації, щоб оцінити їх поведінку, змінюючи характеристики, які включають [35]:

- щільність приладової системи. У щільних приладових системах, невеликі відстані між вузовими пристроями, що призводить до зниження похибок в оцінці відстані, а також похибок локалізації системи. Крім того, велике число сусідів призводить до додаткової інформації, яка має змогу бути використана невідомими вузовими пристроями щоб краще обчислити його положення

- масштаб приладової системи. Збільшення кількості вузових пристроїв призводить до підвищення кількості хопів. Як правило, велике число хопів призводить до більш неточних розрахунків розташування, підвищення середньої похибки локалізації системи

- кількість якірних вузлових пристроїв. Розгортаючи більш високе число якірних вузових пристроїв маяка в БСПС, похибка системи локалізації має тенденцію зменшуватися, і число опорних вузових пристроїв в має тенденцію збільшуватися [35].

- точність GPS. GPS не дає ідеальної локалізації, особливо в БСПС. Оскільки більша частина якірних вузових пристроїв використовують GPS, щоб отримати свої координати, точність GPS вплине на остаточне положення про похибки локалізації системи, які залежать від цієї послуги [35].

В алгоритмі локалізації "кожен з кожним" Positioning System (APS), кожен вузловий пристрій оцінює свою відстань до опорних вузових пристроїв в хопах. Як тільки ці відстані оцінені, вузлові пристрої можуть обчислити свої



позиції, застосовуючи трилатерацію. Розглянемо два методи: DV-Hop, DV-Distance (рис. 2.12.) [29].

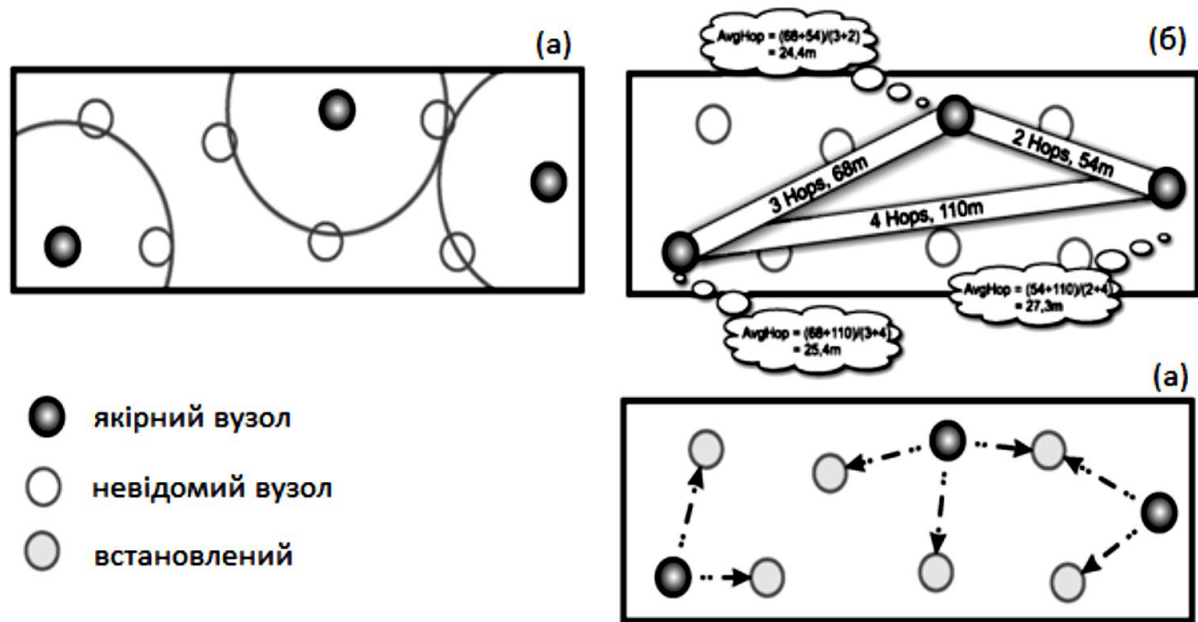


Рисунок 2.12. – Метод DV-Hop

У методі DV-Hop якірні вузлові пристрої в радіусі своєї дії передають серії повідомлень (рисунок 2.12.а). Працюючи як розширення векторного алгоритму відстані, усі вузлові пристрої отримують інформацію про розташування усіх якірних вузлових пристроїв так само як кількість хопів до цих якорів [47, 35].

Коли якірний вузловий пристрій отримує інформацію позиції від інших якірних вузлових пристроїв, у нього є достатньо інформації, щоб вичислити середній розмір одного хопу, заснованого на його власній позиції, на позиції інших якірних вузлових пристроїв, і також на кількості хопів серед них (рисунок 2.12.б).

Коли невідомий вузловий пристрій отримує виправлення, він у змозі перетворити його відстань до якірного вузлового пристрою від кількості хопів у метри (рисунок 2.12.в). Отже, алгоритм локалізації DV можна представити сукупністю наступних кроків [35]:

- 1:  $positionns_i = \emptyset$ ; {встановлення якірних вузлів}
- 2:  $correction_i = -1$ ;
- 3:  $msg_i = nil$ .
- 4: **if**  $n_i \in B$  **then** {якщо це якірний вузол}
  - 5:  $(x_i, y_i) := getGpsPositions()$ ;
  - 6: *Send beaconPos*( $i, x_i, y_i, 0$ ) to all  $n_j \in N_i$ .
- 7: **end if**
- 8:  $msg_i = beaconPos(k, x_k, y_k, h_k)$ .
- 9: **if**  $k \notin R_i$  **then** {якщо цей вузол не отримав пакет}
  - 10:  $R_i := R_i \cup \{k\}$ ;
  - 11:  $positions_i := positions_i \cup \{(x_k, y_k, h_k)\}$ ;
  - 12: **if**  $n_i \in B$  **then** {якщо це якірний вузол, чекати більше пакетів}
  - 13: *StartwaitTimer*.
  - 14: **end if**
  - 15: *send beaconPos*( $k, x_k, y_k, h_k + 1$ ) to all  $n_j \in N_i$ .
- 16: **end if**
- 17: *waitTimer timeout* {тільки для якірних вузлів}
- 18:  $correction_i = \frac{\sum \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum h_j}, (x_j, y_j, h_j) \in positions_i$ ;
- 19: *sendcorrection\_i* to all  $n_j \in N_i$ .
- 20:  $msg_i = correction_k$
- 21: **if**  $n_i \in U$  **then** {якщо це невідомий вузол}
  - 22:  $correction_i := corection_k$ ;

23:  $h_j := h_j * correction_i$  to all  $(x_j, y_j, h_j) \in positions_i$ ;

24:  $(x_i, y_i) := positionComputation(positions_i)$ ;

25: send  $correction_i$  to all  $n_j \in N_i$ .

26: end if

Складність обміну повідомлення цим алгоритмом управляється загальною кількістю якорів і невідомих вузлів, яка вираховується як  $O(n*(m+1))$ , де  $n$  – кількість вузлів, і  $m$  – кількість якірних вузлів [35].

Метод DV-Distance працює так само як DV-Hop. Але, замість того, щоб поширювати кількість хопів, він поширює передбачувані відстані (як у випадку з, застосовуючи RSSI) і кожен вузловий пристрій, перш, ніж відправити інформацію позиції якірних вузлових пристроїв, додає свою передбачувану відстань до того, що містилося в пакеті. В цьому випадку, немає ніякої потреби в коефіцієнті виправлення, тому що відстані до якірних вузлових пристроїв вже вказані в метрах. Перевага специфікації системи визначення позиції, полягає в тому, що її алгоритм локалізації вимагає невеликої кількості якірних вузлових пристроїв, щоб працювати. Проте, спосіб, яким відстані передаються, так само як довжина відстані, перетворена з хопів у метри в DV-Hop, результати в помилковому обчисленні позиції, збільшують кінцеву похибку локалізації системи [35].

**Рекурсивна оцінка позицій.** В алгоритмі рекурсивної оцінки позиції (від англ. Recursive Position Estimation, далі RPE), вузли обчислюють своє положення за допомогою якірних вузлів. Обчисливши своє розташування невідомий вузловий прилад БСПС стає опорним. Кількість опорних вузлів ітераційно збільшується. Алгоритм RPE має змогу бути розділений на чотири рівні як зображено на рисунку 2.12 [39]. У першому рівні вузловий прилад БСПС визначає свої якірні вузли. На другому рівні вузловий прилад БСПС оцінює свою відстань до опорних вузлів, наприклад, RSSI. В третьому рівні вузловий прилад БСПС обчислює своє положення, використовуючи трилатерацію. На

останньому рівні вузловий прилад БСПС стає опорним вузлом, передаючи своє місце положення своїм сусідам [35].

Коли невідомий вузловий прилад БСПС стає опорним, він має змогу допомогти іншим вузловому приладу БСПСм також обчислювати свої позиції.. На рисунку 2.12,а вузловий прилад БСПС 14 має тільки два якірні (вузли 9 і 13), які не можуть допомогти вузлу обчислювати свою позицію. Як бачимо, восьмий вузловий прилад БСПС також не знає свого розташування, але має змогу його обчислити (рисунок 2.12,б), обчисливши свою позицію стає третьою опорною точкою (рисунок 2.12,в) для вузлового приладу БСПС 14, який має змогу обчислити позицію потрібного вузлового приладу БСПС (рисунок 2.12,г).

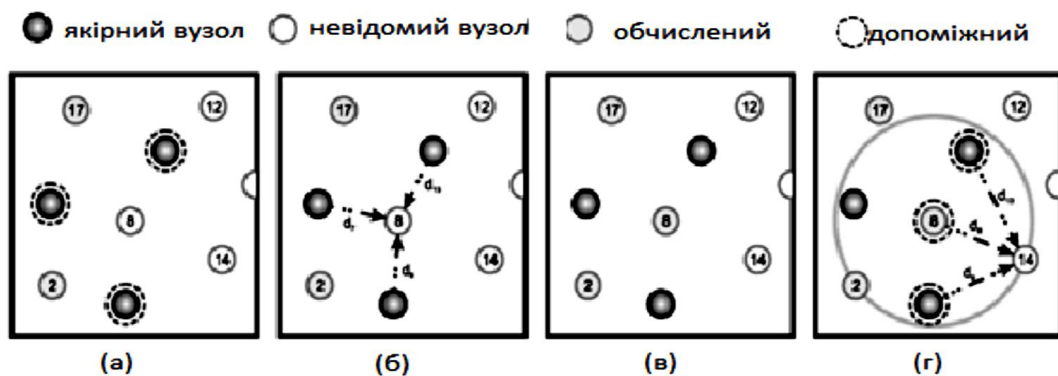


Рисунок 2.12 – Чотири рівні алгоритму RPE

На основі розглянутих чотирьох рівнів алгоритм локалізації можна записати таким чином:

- 1:  $positionns_i = \emptyset$ ;
- 2:  $references_i = \emptyset$ ;
- 3:  $msg_i = nil$ .
- 4: **if**  $n_i \in B$  **then** {якщо це якірний вузол}
  - 5:  $(x_i, y_i) := getGpsPositions()$ ;
  - 6:  $Send\ beaconPos(x_i, y_i, 0)$  to all  $n_j \in N_i$ .
- 7: **end if**
- 8:  $msg_i = position(x_k, y_k, r_k)$  such that  $dist_k = distanceEstimation$ .
- 9: **if**  $n_i \notin U$  **then** {якщо цей вузол не отримав пакет}

```

10:  $positions_i := positions_i \cup \{(x_k, y_k, r_k, dist_k)\};$ 
11: StartwaitTimer.
12: end if
13: waitTimer timeout
14: if  $size(positions_i) \geq 3$  then {якщо є достатньо позицій}
    15:  $references_i := chooseThreeBestPositions(positions_i)$ 
    16:  $(x_i, y_i, r_i) := positionComputation(references_i);$ 
    17: send  $positions_i(x_i, y_i, r_i)$  to all  $n_j \in N_i$ .
18: end if

```

Перевага цього алгоритму полягає в тому, що число опорних вузлів швидко збільшується, у такий спосіб, яким більшість вузлів можуть вичислити їх позицію. Але у цьому методі є недолік розмноження похибки локалізації. Це означає, що низька неточна оцінка позиції вузлового приладу БСПС має змогу використовуватися іншими вузлового приладу БСПСми, щоб обчислити їх розташування, збільшуючи цю похибку. Прикладом цієї проблеми - те, що вузловий прилад БСПС 14 в рисунку 2.12 отримає помилку локалізації, більшу ніж вузловий прилад БСПС під номером вісім. Крім того, у вузлового приладу БСПС мають бути принаймні три опорні вузли, щоб обчислити його позицію [35].

**Локалізація з мобільним вузлом.** Мобільний вузловий прилад БСПС це – вузловий прилад БСПС, який знає про свою позицію (наприклад, обладнаний Gps навігатором), у якого є здатність рухатися серед вузлів. Цим вузлом має змогу бути людина, безпілотний транспортний засіб, літак, або робот. Алгоритм локалізації з використанням мобільного вузлового приладу БСПС, дозволяє вузлового приладу БСПСм обчислювати свою позицію. Системна операція дуже проста, як тільки вузли розгорнуті, мобільний вузловий прилад БСПС рухається через поле вузлів і передає широкомовні повідомлення, які містять його поточні координати. Коли нерухомий вузловий прилад БСПС



отримує більше ніж три повідомлення від мобільного вузлового приладу БСПС, він обчислює свою позицію, використовуючи імовірнісний підхід, заснований на отриманих координатах і на оцінках відстані RSSI. На рисунку 2.13 показано даний приклад і зображено три можливі траєкторії для мобільного вузлового приладу БСПС [35].

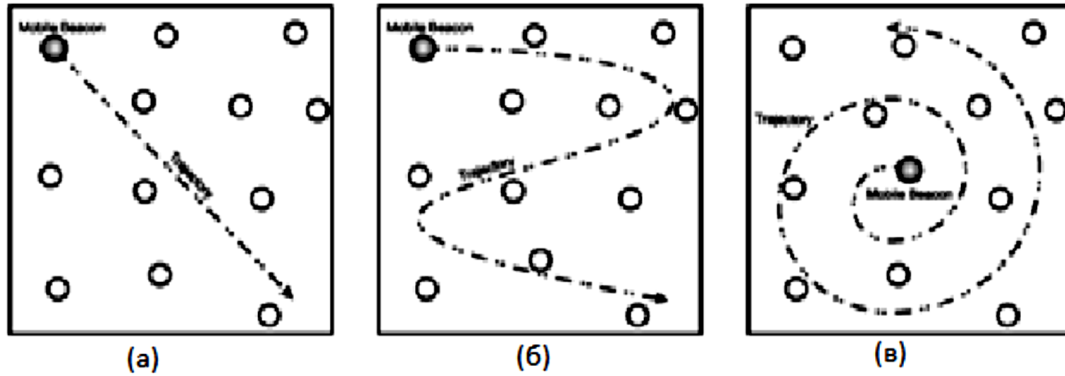


Рисунок 2.13 – Системна операція мобільного вузлового приладу БСПС і можливі траєкторії для локалізації: а) прямолінійна траєкторія; б) менш прямолінійна траєкторія; с) траєкторія в формі спіралі

Алгоритм локалізації з використанням мобільного вузлового приладу БСПС можна записати таким чином:

```

1:  $positionns_i = \emptyset$ ;
2:  $msg_i = nil$ .
3: if  $n_i \in U$  then {якщо це якорний вузол};
   4: StartWalking();
   5: start posTimer.
6: end if
7: posTimer timeout.
8:  $(x_i, y_i) := getGpsPosition()$ ;
9: Send  $position(x_i, y_i)$  to all  $n_j \in N_i$ .
10: Restart posTimer.
11:  $msg_i = position(x_k, y_k)$  such that  $dist_k = distanceEstimation(msg_i)$ ;
12:  $positions_i := positions_i \cup \{(x_k, y_k, dist_k)\}$ ;

```

```

13: if  $size(positions_i) \geq 3$  then {якщо є достатньо позицій};
    14:  $(x_i, y_i) := positionComputation(references_i)$ ;
15: end if

```

Перевага цього алгоритму полягає в тому, що обчислення позиції засновані на тому ж самому вузлі (мобільному вузлі), із збереженням низької помилки локалізації і запобіганню поширенню цієї помилки. Крім того, алгоритм LMB уникає використання вузлів, обладнаних універсальною системою, за винятком мобільного вузлового приладу БСПС. З іншого боку, вузловий прилад БСПС має змогу оцінити тільки свою позицію, коли мобільний вузловий прилад БСПС проходить біля цього вузлового приладу БСПС, що має змогу зайняти певний час залежно від коефіцієнтів як розміру вузлового приладу БСПС, особливості руху, і траєкторії вузлового приладу БСПС [35].

Важливим аспектом, який безпосередньо впливає на оцінку розташування, є траєкторія мобільного вузлового приладу БСПС. Чим менш прямолінійний траєкторія, тим краща оцінка. Тому, що чим нижче колінеарність серед вузлів, тим нижча помилка. Таким чином, прямолінійних траєкторій, таких як зображено на рисунку 2.13,а треба уникнути [35].

#### 2.4. Дослідження алгоритмів локалізації безпроводних сенсорних приладових систем

**Метод RSSI.** Найбільш простим методом визначення дальності до вузлового приладу БСПС є індикація рівня прийнятого сигналу (*Received Strength Signal Indication*). Будьякий канал БСПС стандарту IEEE 802.15.4 має функцію протоколу аналізу рівня покриття (*Link Quality Indicator*), дія якої зводиться до знаходження рівня прийнятого сигналу. Результат цього виміру можна вивести, відкалібрувати за відомою дальністю і оцінити дальність до джерела. Вимірювання відстані проводиться таким чином. Приймаючий пристрій з логарифмічною амплітудною характеристикою приймає сигнали, за якими вбудований індикатор *RSSI* формує 8-розрядний код *RSSIVAL*. Цей код

виходить в результаті усереднення по восьми періодам (128 мкс) прийнятого сигналу і забезпечується бітом стану, що вказує, коли  $RSSI_{VAL}$  є дійсним (тобто приймаючий пристрій мав можливість прийняти по крайній мірі вісім періодів). потужність прийнятого сигналу  $P$  (дБм) обчислюється за формулою [16]:

$$P = RSSI_{VAL} + RSSI_{OFFSET},$$

де  $RSSI_{OFFSET}$  – постійна, яка підбирається емпіричним шляхом (близько – 45 дБм). Оскільки в ідеальних умовах потужність обернено пропорційна квадрату відстані, то логарифм потужності прямо пропорційний відстані з деяким коефіцієнтом, який встановлюється також емпірично. Даний підхід реалізований в мікроконтролерах *ZigBee* фірми TI серії CC2431.

Проте цьому методу притаманний ряд істотних обмежень, оскільки рівень сигналу є вельми мінливим параметром через вплив наступних факторів:

- швидкі і повільні завмирання сигналів на шляху через зміну умов поширення радіохвиль;
- багатопроменеве поширення внаслідок відображень від різних металевих предметів;
- нерівномірність вихідної потужності передавальних пристроїв і чутливості приймаючих пристроїв;
- вплив орієнтації антен через нерівномірність діаграми спрямованості.

Через дії зазначених факторів реальна залежність потужності від відстані виявляється нелінійною і непостійною в часі, внаслідок чого точність вимірювань швидко падає зростанням відстані. Як показано нижче, практичне застосування цього методу в БСПС *ZigBee* обмежене дистанціями приблизно до 10 м, при цьому відстань вимірюється з точністю близько 3 м.

**Метод ToF.** Інший підхід заснований на вимірюванні часу проходження сигналу (Time ofFlight). Роутер надсилає запит на інший вузловий прилад БСПС, отримує відповідний сигнал і визначає час його затримки. Повна затримка складається з апаратних затримок при обробці прийнятого і



формуванні відповідного сигналів і часу поширення між вузлового приладу БСПСми.

Оскільки технічні затримки відомі з достатньою точністю, то їх можна відняти від повного значення, і величина, що залишилася, буде характеризувати час прольоту сигналу туди і назад. Помноживши половину часу затримки на швидкість світла, отримаємо відстань між вузлового приладу БСПСми БСПС. У цьому методі забезпечується лінійний зв'язок між відстанню і вимірюваною величиною, і абсолютна точність вимірювання не залежить від відстані. Для підвищення точності використовують багаторазові повторення процедури вимірювання. Реально цей метод ефективний в повному діапазоні дальності роботи БСПС (зазвичай сотні метрів). На рис. 2.14 наведені експериментальні результати вимірювань відстані методами RSSI і ToF, отримані в БСПС з мікроконтролерів JN5148. Кожна точка на графіку визначена шляхом усереднення 25 вимірювань. З графіків видно, що похибки при використанні методу ToF істотно менші, ніж при RSSI, в якому вже на дуальностях більше 20 м похибки вимірювань перевищують саме значення дальності.

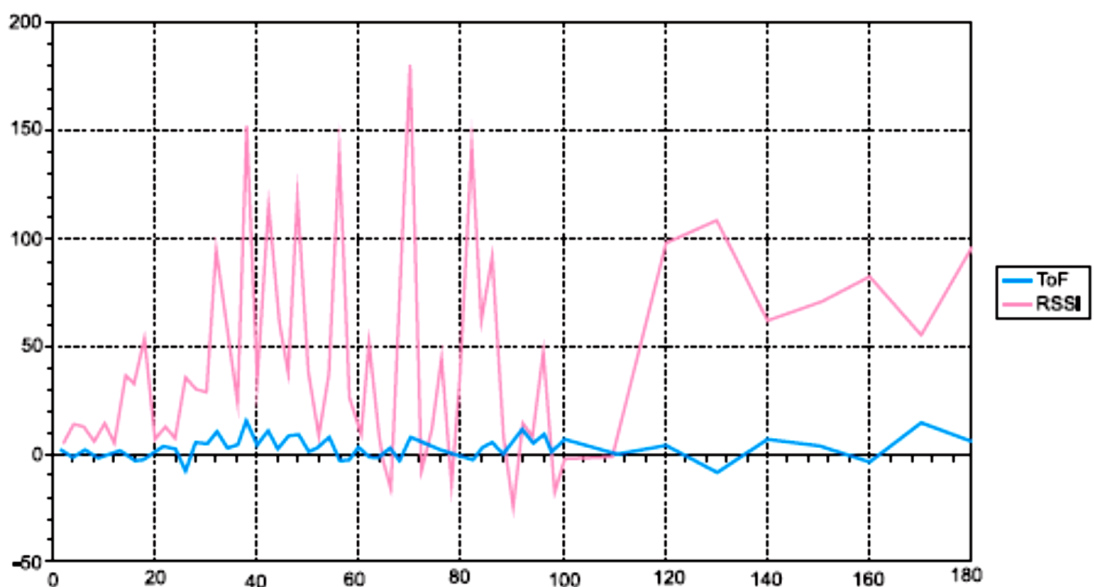


Рисунок 2.14 – Залежності похибок вимірювання відстані методами RSSI і ToF від відстані

**Реалізація алгоритму вимірювання.** Для вимірювання часу прольоту сигналу між вузлового приладу БСПСми будь-якої БСПС ZigBee можна просто

використовувати один з периферійних таймерів. Перед посилкою запитального пакета таймер запускається, а після прийому відповіді зупиняється. Можна використовувати таймер vАНІ з оболонки API. Оскільки в більшості БСПС ZigBee відсутній прямий доступ до регістру мікроконтролера, то vАНІ слід ввести в режим повторення і використовувати одержувані при цьому такти переривання для отримання потрібного рахунку. Як варіант реалізації такого методу можна використовувати програму на мові C, що наведена в додатку 3.

Запуск цього коду забезпечує отримання затримки в 1 мс, наявний параметр 16000 задає період проходження переривань 1 мс при тактовій частоті 16 МГц. При бажанні цей параметр можна змінити і отримати іншу частоту переривань. Можливо також використовувати функцію `u16АНІ_TimerReadCount()`, що дає кращу точність при затримках менше 1 мс. Метод ToF реалізований апаратно в мікроконтролерах Jennic JN5148 і є винятковою особливістю мереж на цих МК. Функціональна схема мікроконтролера JN5148 приведена на рис. 2.15 Блок <Ranging Engine> - виконавчий елемент апаратної реалізації ToF. алгоритм вимірювання є стандартною функцією програмного забезпечення протоколу IEEE 802.15.4 мікроконтролерів JT5148.

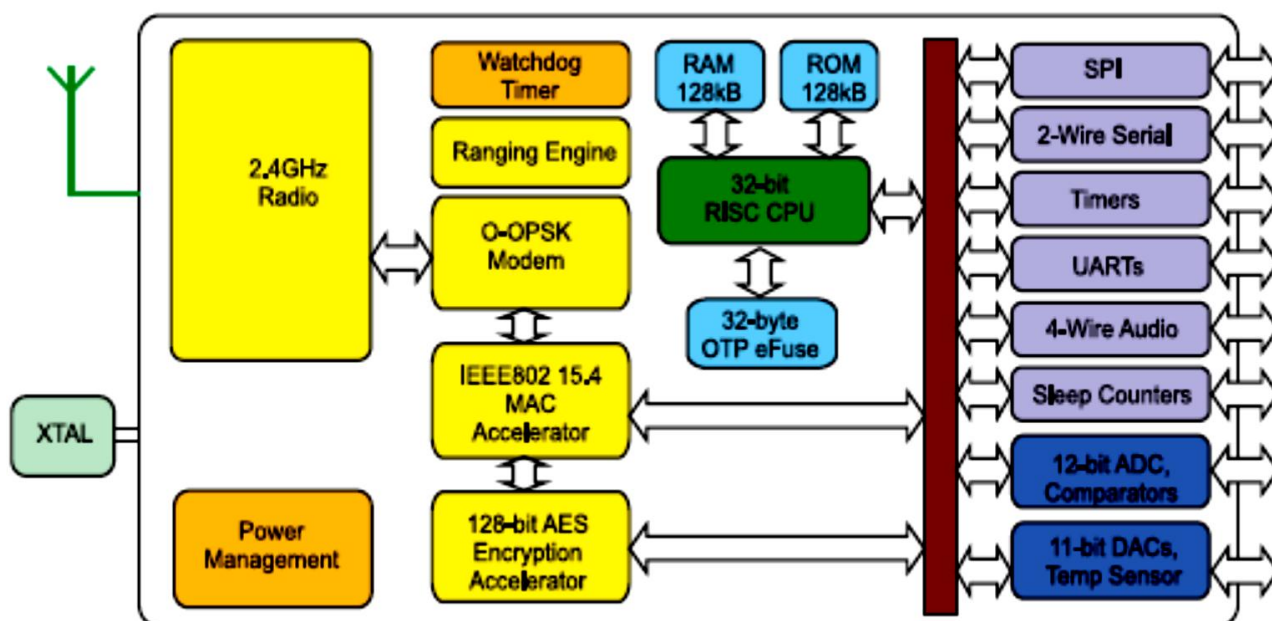


Рисунок 2.15 – Функціональна схема мікроконтролера JN5148

Текст програми на мові С алгоритму ToF маєтья у пакеті JN-SW-4043, який доступний для скачування з веб-сторінки всім зареєстрованим розробникам. У мережах на JN5148 є унікальні керуючі пакети для проведення вимірювань за методом ToF, зокрема, модуль AppAriToF.h мовою С в складі пакету JN-SW-4043. Спеціальні MAC-патчі для стека дозволяють розпізнати ці пакети. Цикл вимірювань займає не більше 10 мс, для індикації використовується відправлення сигналів з частотою імпульсів 16 МГц. Процес вимірювання ілюструє рис. 3.

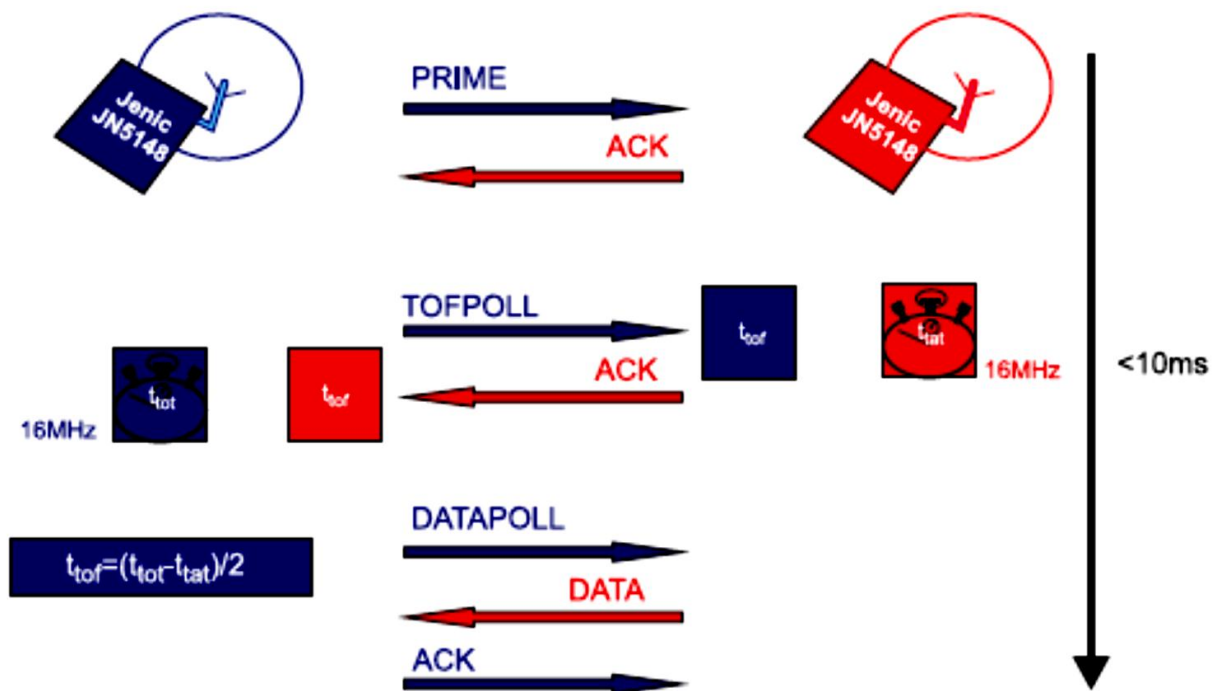


Рисунок 2.16 – Послідовність операцій по вимірюванню часу прольоту сигналу

Спочатку відправляється первинний запит, на нього приходить відповідь, що ідентифікує вузловий прилад БСПС. Потім направляється запит з частотою імпульсів 16 МГц і запускається лічильник для фіксації часу посилки, після отримання відповіді лічильник зупиняється. час прольоту визначається як половина різниці показань лічильника. Всі обчислення з вимірюваними затримками доцільно проводити в одиницях часу (Мікросекунди) і тільки при остаточному виведення перераховувати в метри множенням на швидкість світла (300 м/мкс).

**Точність вимірювань в методі ToF.** Точність вимірювань визначається рядом чинників:

- стабільністю частоти задаючих генеруючий пристрійів;
- затримками фронтів імпульсів при прийомі і випромінюванні;
- відношенням сигнал/шум;
- похибками через багатопроменеве поширення.

Якщо використовувати найпростішу обробку без попередньої фільтрації сигналів, то похибки можуть бути надто великими в першу чергу через багатопроменеве поширення сигналів. Такі умови найчастіше виникають при роботі в приміщеннях або поблизу будь-яких будівель. Наприклад, при роботі в будівлі на відстані 24 м були отримані наступні результати:

- вимірювання дальності шляхом передачі сигналів по кабелю дали точність 0,75 м (при похибці вимірювання затримок сигналу 5 нс);
- середня точність вимірювання дальності по повітрю склала 5,6 м, при цьому максимальні похибки в 90% випадків не перевищували 12,1 м;
- точність визначення координат на основі попарних вимірювань дальності склала 3,5 м з максимальною похибкою в 90% випадків більше 6,2 м.

При вимірах на місцевості з тієї ж апаратурою на дальності 180 м були отримані наступні результати:

- середня похибка вимірювання дальності склала 3,9 м при максимальній похибці в 90% випадків до 9,1 м;
- похибка визначення координат вузлів в межах ділянки  $20 \times 35$  м склала 2,2 м при максимальній похибці в 90% випадків до 4,6 м.

Звідси випливає, що найпростіша фільтрація аномально великих відхилень, що викликаються багатопроменевим поширенням, могла б в кілька разів підвищити точність вимірювань.

Подальший шлях підвищення точності вимірювань в БСПС ZigBee (більш ніж на порядок) можливий шляхом ускладнення алгоритму обробки. Для отримання високої точності навіть в умовах багатопроменеве поширення

використовувався синтез когерентних сигналів в декількох каналах і застосовувався спеціальний метод оцінки фази сигналу, при цьому смуга спектра сигналу була розширена до 80 МГц. Використовувалися стандартні посилки пачок імпульсів. Згідно з отриманими експериментальним результатам, при використанні звичайних кварцових генеруючий пристрійів в БСПС з частотою 2,4 ГГц максимальні похибки вимірювання не перевищували 16 см, а середньоквадратична точність визначення координат вузлів склала 3 см. При заміні на високостабільний термокомпенсований кварцовий генеруючий пристрій максимальна похибка і середньоквадратична точність склали відповідно 9 і 1 см.

Визначення відстані – це тільки перша частина задачі локалізації вузлового приладу БСПС. для знаходження координат необхідно виміряти відстань з двох рознесених точок з відомим місцем розташування (рис. 2.17).

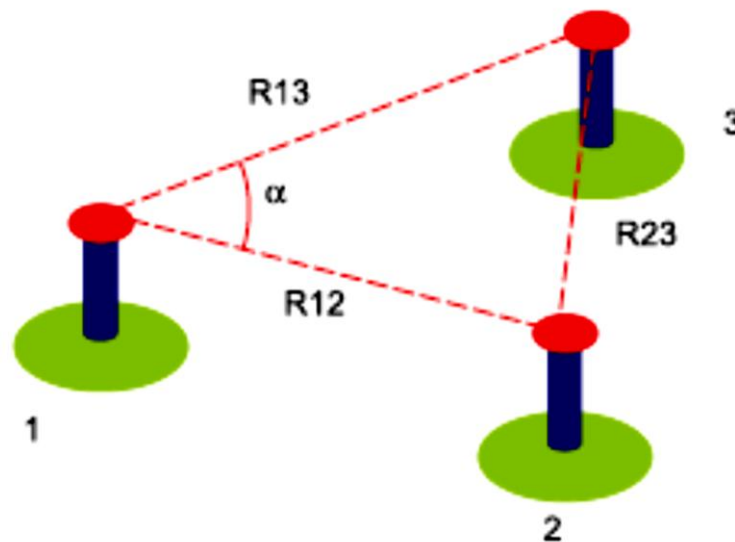


Рисунок 2.17 – Геометрія розрахунку дальності до вузлового приладу БСПС 3 за відомими координатами вузлів 1 і 2

Якщо при вимірах відстані з двох вузлів 1 і 2 до вузлового приладу БСПС 3 були отримані значення  $R_{12}$ ,  $R_{13}$  і  $R_{23}$  між ними, то кут напрямку  $\alpha$  до вузлового приладу БСПС 3 щодо базової лінії 1-2 можна знайти за формулою:

$$\cos \alpha = \frac{R_{12}^2 + R_{13}^2 - R_{23}^2}{2R_{12}^2 R_{13}^2}$$

Для підвищення точності вимірювань слід багаторазово повторити процедуру вимірів і усереднити результат. Вимірювання відстаней – не єдина можливість БСПС ZigBee. При використанні високоточних алгоритмів вимірювання можна також визначати швидкість переміщення вузлового приладу БСПС. Оцінку швидкості можна робити зі зміни відстані при декількох послідовних вимірах. За вимірами з двох точок можна знайти тільки проекцію швидкості на напрям на відомий вузловий прилад БСПС. Якщо ж вимірювати дальність з трьох або більше точок, то можна визначити проекції швидкості на напрям на ці вузли і по ним вже знайти повний вектор (величину і напрямок) швидкості. Цикл вимірювання відстані в БСПС Jennic не перевищує 10 мс при роботі з суміжним вузлом, тому можна робити виміри десятки разів в секунду. При часі вимірювання 1с з можна визначити швидкість з точністю близько 2-3 м/с, а в системі з високоточним алгоритмом – на порядок точніше.

## **Висновки до розділу 2**

1. Проведено аналіз методів та алгоритмів локалізації з використанням наступних компонентів систем локалізації: оцінка відстані/кута, обчислення позиції та алгоритм локалізації [6].
2. Запропоновано моделі, методи та рекомендації вимірювання лінійно-кутових величин на основі часу прибуття сигналу та падіння його потужності.
3. Визначено, що вибір методу оцінки відстані між вузловими пристроями в системі локалізації є важливим коефіцієнтом, який впливає на продуктивність системи. Зазвичай, щоб оцінити точне розташування вузлового пристрою потрібно використовувати принаймні три оцінки відстані. Але з іншої сторони, якби тільки точність таких методів була важлива, то ми могли б тільки використовувати TDoA, у якому є найнижчі помилки. Але коефіцієнти, такі як розмір і вартість (в термінах апаратних засобів, процесора, і енергії) вузлових пристроїв мають також бути враховані [7].

4. Визначено, що результат рішення поставленої математичної задачі визначення координат в БСПС, незалежно від алгоритму визначення координат, залежить від ряду початкових умов : наявність базису (об'єктів з відомими координатами), точність вимірювання відстаней, рівномірність і щільність розподілу об'єктів БСПС .

5. Виявлено, що точність вимірювання відстаней залежить від способу оцінки відстані.

6. Проведено порівняльний аналіз методів та алгоритмів локалізації з використанням наступних компонентів систем локалізації: оцінка відстані/кута, обчислення позиції та алгоритм локалізації [6, 7].

7. Визначено, що вибір методу оцінки відстані між вузловими пристроями в системі локалізації є важливим компонентом, який впливає на продуктивність системи. Зазвичай, щоб оцінити точне розташування вузлового пристрою потрібно використовувати принаймні три оцінки відстані.

8. Визначено, що також не мало важливим є вибір методу обчислення позиції. Тому що обраний метод має змогу також впливати на кінцеву продуктивність системи локалізації. Залежно від використовуваного алгоритму локалізації, похибка в обчисленні позиції має змогу завдати шкодити у великий або незначній мірі системі локалізації в цілому.

9. Виявлено, що у деяких алгоритмах, як у випадку 3, вузлові пристрої які були невідомими обчисливши свою позицію розташування використовуються, щоб допомогти іншим невідомим вузловим пристроям обчислювати свої позиції. В цьому випадку, незначна похибка в обчисленні позиції має змогу внести великі похибки роботу системи локалізації.

10. Визначено, що інформація про розташування і відстані, що зібрані вузлом і доступними ресурсами процесора також, обмежує вибір методу, який буде використовуватися.

11. Виявлено, що алгоритм локалізації – основний компонент системи локалізації. Цей компонент визначає, яким чином інформація, що надійшла від

якірних вузлових пристроїв, що містить оцінки відстаней і дані про обчисленнях позиції, буде передаватися, щоб якомога швидше розповсюджувалась інформація про локалізацію від якірних вузлових пристроїв до вузлових пристроїв БСПС.

12. Запропонований метод і алгоритми визначення координат, призначений для використання в БСПС з рівномірним розподіленням об'єктів всередині БСПС, оснований на оцінці відстаней між об'єктами в умовах помилок, припускаючи наявність всередині БСПС частки об'єктів з відомими координатами. Запропонований метод і алгоритми відноситься до класу ітераційних методів і алгоритмів з розповсюдженням довіри. При цьому метод і алгоритми мають наступні переваги:

- Можливість використання в будь-яких умовах
- Простота реалізації
- Невелика обчислювальна складність алгоритму
- Можливий для БСПС з високою щільністю розподілення об'єктів

13. Визначено, під час експериментального дослідження, що:

- Метод визначення відстані між вузловим приладом БСПСми на основі RSSI придатний для вимірювань на невеликих відстанях (до 10 м);
- Метод ToF має низку переваг перед RSSI, особливо при вимірах на великих відстанях (порядку сотень метрів);
- При використанні методу ToF можливо визначення координат і вектора швидкості руху вузлів БСПС ZigBee.

## **ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 2**

1. Дуднік А. С. Аналіз методів вимірювання відстаней між об'єктами за допомогою сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №3. С. 213 -216. (РИНЦ, ScholarGoogle, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)



2. Boukerche A., Nakamura E. Localization systems for wireless sensor networks [Текст]. IEEE Wireless Communications Special Issue on Wireless Sensor Networks, 2007. – P. 6–12
3. He T., Huang C., Blum B. Range-free localization schemes for large scale sensor networks [Текст] // In MobiCom '03: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, New York, 2011, ACM Press, New York. – P. 81–95. 83.
4. Derivation of Friis Transmission Formula [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>. The Friis Equation – Назва з титул. екрану.
5. Savvides A., Han C. Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors [Текст] // In 7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2010. – P. 166–179.
6. Дуднік А.С. Методи визначення відстані між об'єктами сенсорних мереж [Текст] /А.С. Дуднік // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 17. С. 40 -49. **(Norwegian Register for Scientific Journals, BASE, Citefactor, GIF, SIS)**
7. Дуднік А.С. Визначення відстані між об'єктами на основі часу прибуття сигналу [Текст] / А. С. Дуднік // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 18 – 20 квітня 2018 р.: тези допов. – Кам'янець-Подільський., 2018. – С. 25 – 26.
8. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice, 4th edition [Текст] // Springer-Verlag, Berlin. – 2003.
9. Elson J. Time synchronization in wireless sensor networks [Текст] // Department Computer Sciences, University of California, Ph.D. dissertation, Los Angeles. – 2003.

10. Whitehouse K. The design of calamari: An "кожен з кожним" localization system for sensor networks [Текст] // M.S. thesis, University of California at Berkeley. – 2009.

11. Priyantha N., Balakrishnan H., Teller.S. The cricket compass for context aware mobile applications [Текст] // In 7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy, July 2006. – P. 325.

12. Дуднік А.С. Методи визначення координат на основі дальності сигналу та обчислення позиції розташування у пристроях сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 10 – 12 травня 2018 р.: тези допов. – Чернігів., 2018. – С. 173.

13. Golub G., Van Loan C. Matrix Computations [Текст] // 3rd edition, Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD. – 2010. – P. 213.

14. Квасніков В.П. Математична модель локалізації об'єктів за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] / В.П. Квасніков, А.С. Дуднік // Технічне регулювання, метрологія та якість: виклики сучасності: IX Всеукраїнська наук.-практ. конф., 17 – 18 травня 2018 р.: тези допов. – Одеса., 2018. – С. 59 -60.

15. . Квасніков В.П. Наукові основи визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] /В.П. Квасніков, А.С. Дуднік// Метрологія та прилади . – 2018. – Вип. № 3. – С.21 -26. (**Index Copernicus**)

16. Boukerche A., Oliveira H. Towards an integrated solution for node localization and data routing in sensor networks [Текст] // In ISCC '07: 12th IEEE Symposium on Computers and Communications, Aveiro, Portugal, July 2007. – P. 449–454.

17. Boukerche A., Oliveira H., Nakamura E., A novel location-free greedy forward algorithm for wireless sensor networks [Текст] // In Proceedings of the 2008

IEEE International Conference on Communications (ICC 2008), Beijing, China, May 2008.

18. Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks [Текст] // In Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '08), Boston, MA, August 2008, ACM Press, New York, P. 56–67.

19. Brooks R. R., Iyengar. S. S. Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications [Текст] / R. R. Brooks, S. S. Iyengar // Prentice Hall, Englewood Cliffs. –NJ. – 2009. – P. 120.

20. Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks [Текст] // In Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00), Boston, MA, August 2008, ACM Press, New York, P. 56–67.

21. Yu Y., Govindan R., Estrin D.. Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks [Текст]. Technical Report CSD-TR-01-0023, UCLA Computer Science Department, 2011.

22. Boukerche A., Oliveira H. Towards an integrated solution for node localization and data routing in sensor networks [Текст] // In ISCC '17: 22th IEEE Symposium on Computers and Communications, Aveiro, Portugal, July 2017. – P. 449–454.

23. Niculescu D., Nath B. "кожен з кожним" positioning system (aps) using aoa [Текст] // I Proceedings of INFOCOM 2003, San Francisco, CA. – 2009. – P. 238.

24. Дуднік А.С. Вимірювання локації об'єктів за допомогою сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Інформаційні технології та комп'ютерне

моделивання: міжнар. наук.-практ. конф., 14 – 19 травня 2018 р.: тези допов. – Івано-Франківськ., 2018. – С. 24 – 27.

25. Sichitiu M., Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon [Текст] // In Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile "кожен з кожним" and Sensor Systems (MASS 2010), FL, October 2010. – P. 174–183.

26. Simic S., Sastry S. Distributed localization in wireless "кожен з кожним" networks. [Текст] // Technical Report UCB/ERL M02/26, UC Berkeley. – 2003.

27. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice, 4th edition [Текст] // Springer-Verlag, Berlin. – 2003.

28. Savvides A., Han C. Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors [Текст] // In 7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2010. – P. 166–179.

29. Whitehouse K. The design of calamari: An "кожен з кожним" localization system for sensor networks [Текст] // M.S. thesis, University of California at Berkeley. – 2009.

30. Dudnik A. Method for measuring the distance between objects using a digital frequency measuring device [Текст] / A.Dudnik // European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2018. # 4. P. 19 -24. (**ULRICHSWEB, BASE, EBSCO, eLIBRARY.RU, OpenAIRE, RePEc, ROAR, WorldCat**) (Vienna, Austria)

31. ИвановЕ.В., КозловВ.Н., КурикшаВ.А., "Экспериментальное определение ошибки измерения расстояний между устройствами стандарта IEEE802.15.4 [Текст] / ZigBee", "Радиолокация и Связь"(журнал в журнале), 2008г

32. В.С.Шебшаевич, "Сетевые спутниковые радионавигационные системы" [Текст]/, Изд-во "Радиоисвязь", 1993

33. Jan Blumenthal, Ralf Grossmann, Frank Golasowski, Dirk Timmermann, Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks [Текст]/, University of Rostock, 2012

34. N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices" [Текст]/, IEEE Personal Communications Magazine, 7(5):28–34, October 2000.

35. Мандзій В.А. Метод локалізації об'єктів на основі вимірювання потужності сигналу в безпроводних сенсорних мережах: дип...магістра: 8.05010201 "Комп'ютерні системи та мережі" [Електронний ресурс]/ Мандзій Віталій Анатолійович. – Тернопіль, 2012. – 90 с. – Режим доступу: <http://dspace.tneu.edu.ua/bitstream/316497/1473/1/Mandziy+V.A.%2C+KSMm-51.pdf>

36. Дуднік А. С. Аналіз методів вимірювання відстаней між об'єктами за допомогою сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №3. С. 213 -216. (РИНЦ, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus) - Режим доступу: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2018/3/49.pdf>

37. Дуднік А. С. Метод побудови комп'ютеризованого лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №6. С. 15 -18. (РИНЦ, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus) – Режим доступу: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2018/6/4.pdf>

### **РОЗДІЛ 3 ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ ПРИЛАДОВИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН**

В даному розділі запропоновано використання, разом з безпроводними сенсорними вузловими пристроями, технічних засобів, що зазвичай входять до складу різного роду світло і радіо далекомірів та електронних тахеометрів, такі як мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-кутових величин на основі частоти, фази та потужності сигналу, з метою створення, на їх основі, комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин.

Побудовано математичну модель роботи цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу. Розроблено структурну схему цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу, з урахуванням математичної моделі. Обґрунтовано застосування методу вимірювання відстані між об'єктами на основі порівняння потужності відправленого та прийнятого сигналів. Запропонована структурна схема пристрою для вимірювання потужності відправленого та прийнятого сигналів.

За результатами досліджень, проведених у даному розділі, автором опубліковані роботи [1, 6-7, 12, 14-15, 24, 30-31, 33-37].

#### **3.1. Прилади та методи вимірювання відстані на основі часових характеристик**

В активному суміщеніюму передавальний пристрійі (АСП) пристрою БСПСС дальність до цілі визначається виразом [48, 49]:

$$D = \frac{Ct_3}{2}$$

де  $C$  – швидкість розповсюдження радіохвиль,  $t_3$  – час розповсюдження радіохвиль від РЛС до цілі і назад (тобто час затримки прийнятого сигналу відносно зондувального) [48, 49].

В залежності від виду зондувального сигналу (ЗС) величина  $t_z$  має змогу визначатися шляхом вимірювання часового, частотного або фазового зсуву прийнятого сигналу відносно випроміненого (опорного). Відповідно розрізняють три методи вимірювання дальності (віддалі, відстані) до цілі або дальнометрії [48, 49]:

- імпульсний;
- частотний;
- фазовий.

*Імпульсний метод дальнометрії.* Імпульсний метод дальнометрії засновано на безпосередньому вимірюванні часу запізнювання відбитого від цілі радіоімпульсу відносно випроміненого [48, 49].

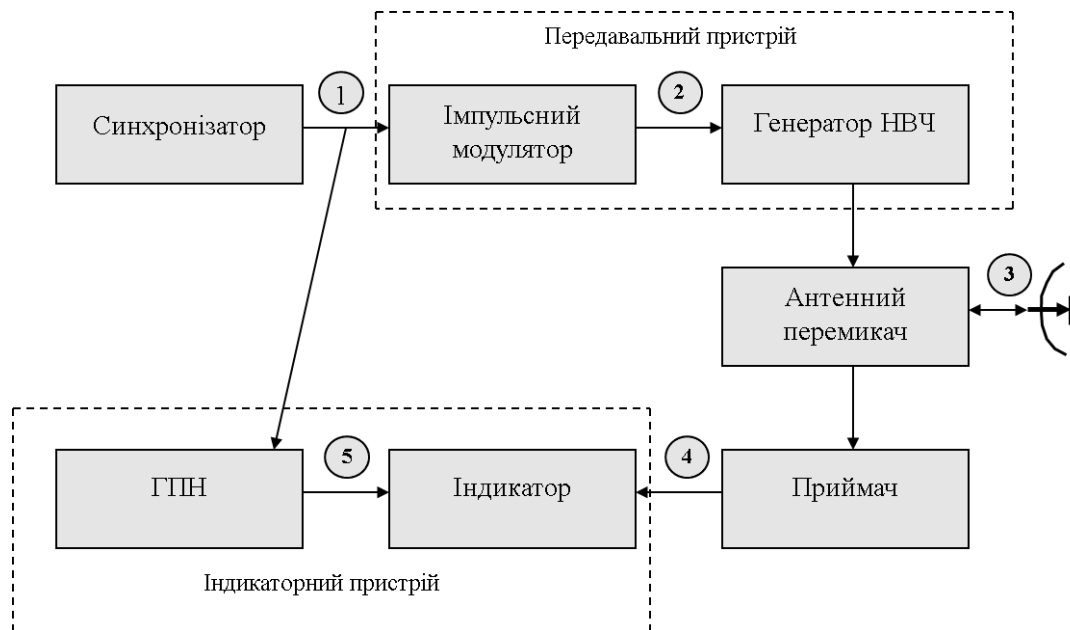


Рисунок 3.1. – Спрощена структурна схема імпульсного передавального пристрою БСПС

*Синхронізатор* – забезпечує одночасний запуск передавального й індикаторного пристроїв. Виробляє короткі відеоімпульси (тривалість порядку одиниць мікросекунд) і задає певну частоту повторення зондувальних сигналів [48, 49].

*Модуючий пристрій* виробляє потужні прямокутні відео імпульси [48, 49].

*Генеруючий пристрій НВЧ* – перетворює енергію модулюючих імпульсів в енергію надвисокочастотних коливань [48, 49].

*Антенний перемикач* – підключає антенний пристрій до передавальний пристрою на час випромінювання ЗС і до приймаючий пристрою в паузах між зондувальними імпульсами [48, 49].

*Антенний пристрій* випромінює потужні НВЧ радіоімпульси у простір і приймає відбиті від цілей НВЧ радіоімпульси [48, 49].

*Приймаючий пристрій* підсилює відбиті НВЧ сигнали і перетворює їх у відеосигнали [48, 49].

*Індикаторний пристрій* відображує на екрані електронно-променевої трубки сигнали відлуння від цілей і масштабні мітки, що призначені для візуального вимірювання координат [48, 49].

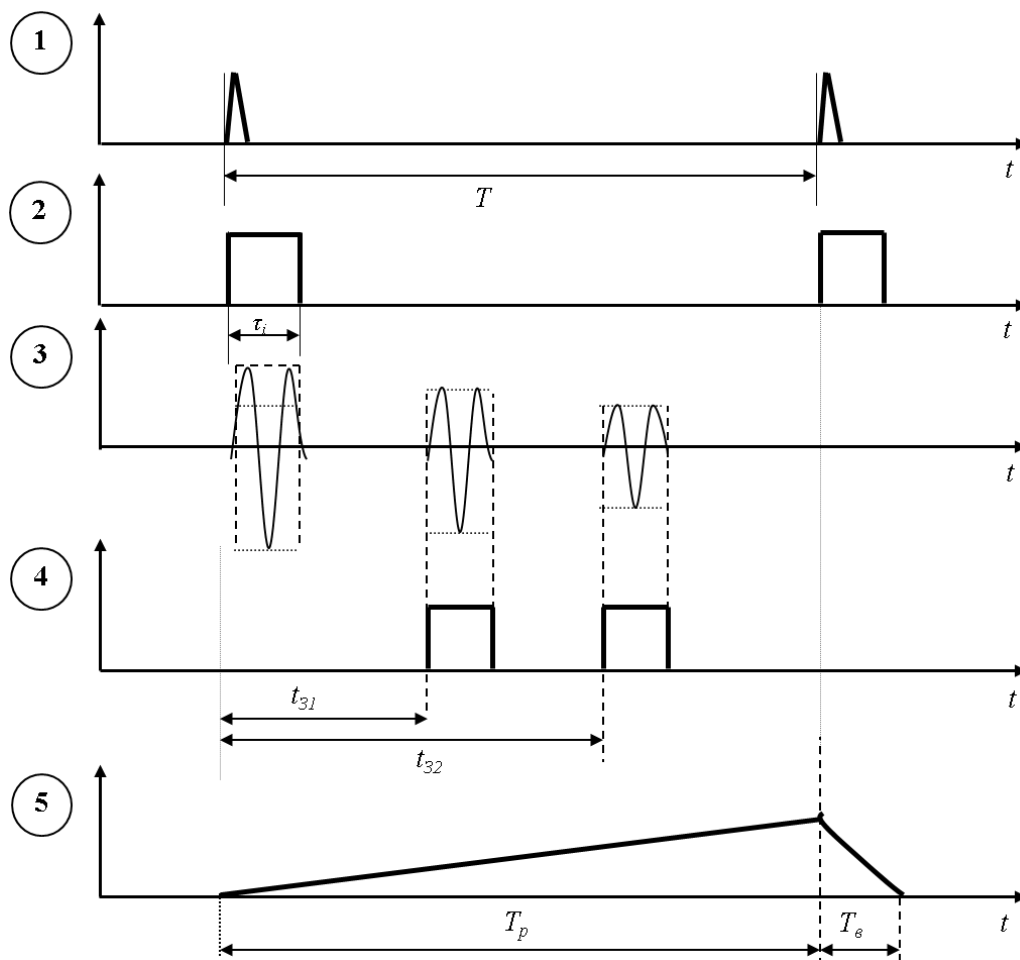


Рисунок 3.2. – Часові діаграми до структурної схеми імпульсного передавальний пристрою БСПС [48, 49].



Передавальний пристрій і ГПН запускаються водночас імпульсами синхронізатора, тому випромінювання ЗС і розгортка на екрані починаються в один і той же момент часу. Відстань, на яку зміщується розгортка до моменту приходу сигналу відлуння дорівнює [48, 49]:

$$L = V_p t_z = \frac{2V_p D}{C} = MD$$

де  $V_p$  – швидкість розгортки;  $M$  – масштаб розгортки [48, 49]..

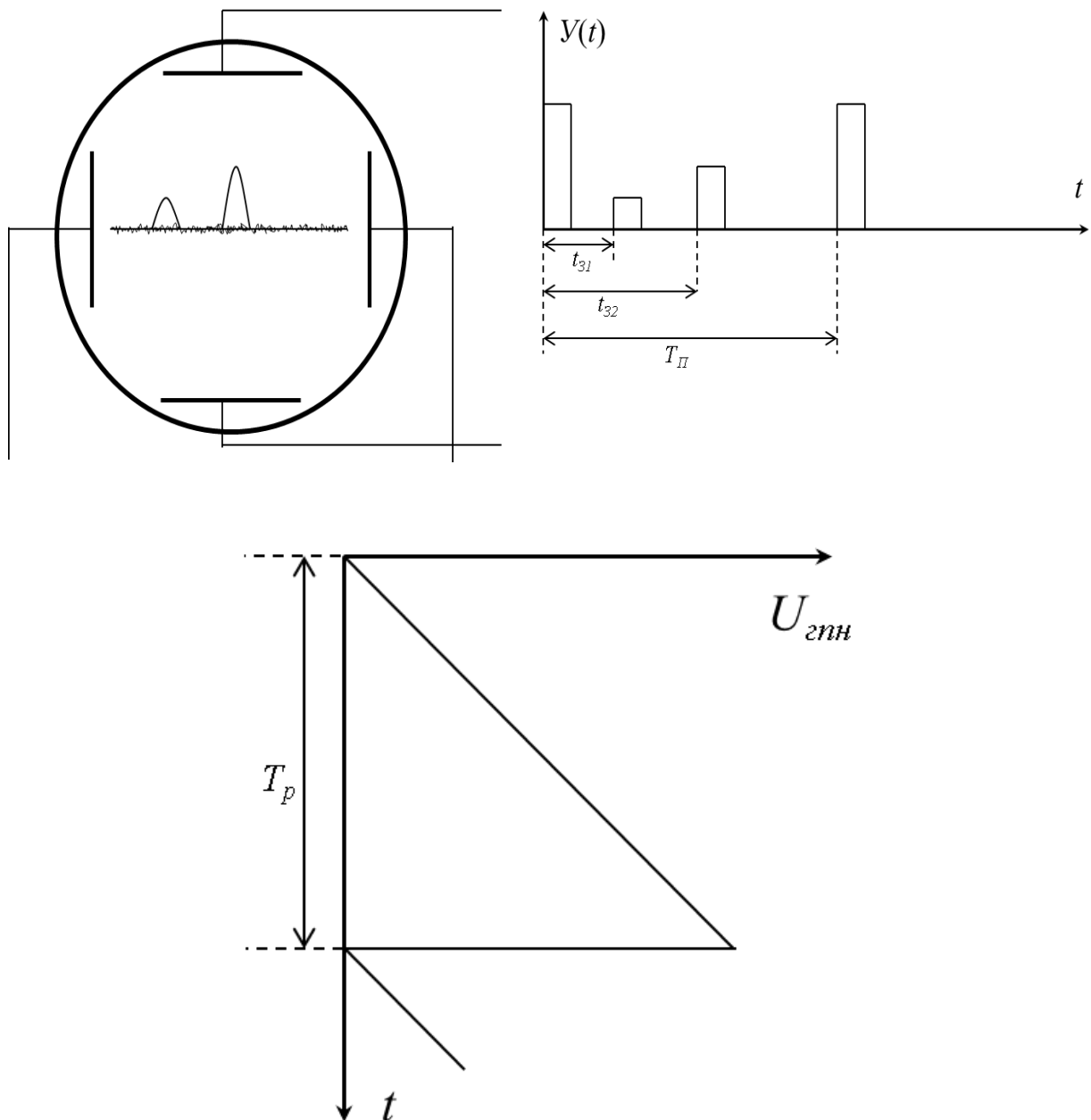


Рисунок 3.3. – Принцип роботи амплітудного індикатора передавальний пристрою БСПС [48, 49]

Індикатори з амплітудною відміткою часто називають індикаторами типу *A*. В РЛС кругового огляду використовують індикатори з відміткою яскравості (індикатори типу *B*) [48, 49].

Прикладом має змогу служити індикатор кругового огляду (ІКО). Про амплітуду сигналу можна судити по яскравості відмітки на екрані ЕПТ [48, 49].

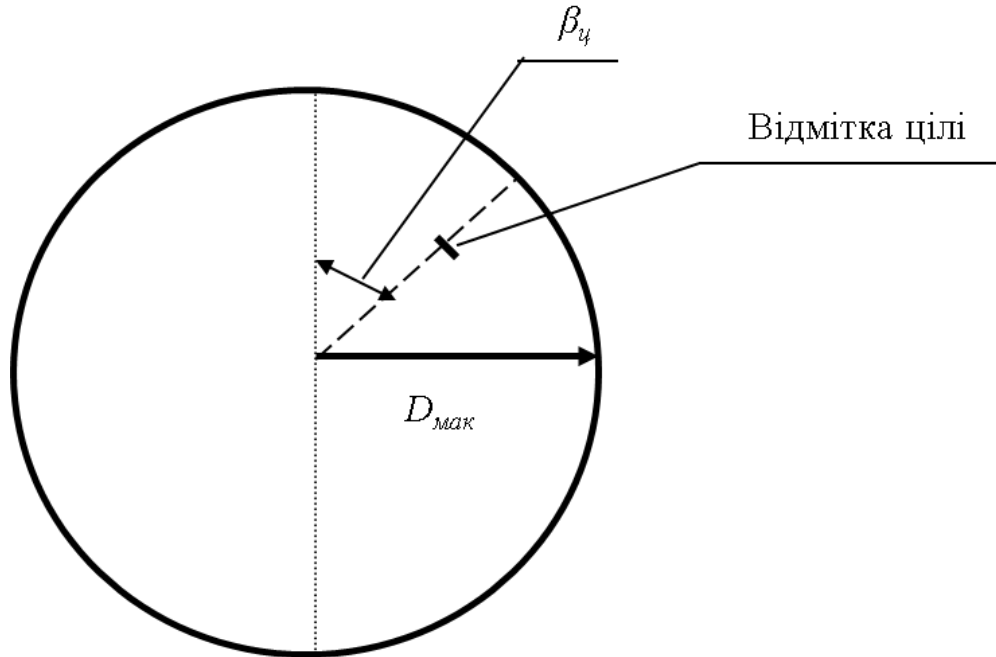


Рисунок 3.4. – Індикація огляду по колу [48, 49]

Значення частоти повторення  $F_n$  зондувальних імпульсів вибирається за умов однозначного вимірювання дальності до цілі. Однозначне визначення дальності в імпульсній РЛС можливо у випадку, коли час запізнення  $t_{3max}$ , котрий відповідає максимальній дальності виявлення, що визначається енергетичним потенціалом РЛС, не перевищує період слідування імпульсів  $T_n$ . [48, 49].

$$T_n > t_3 = \frac{2D_{\max}}{C} \Rightarrow F_n = \frac{1}{T_n} < \frac{1}{t_3} = \frac{C}{2D_{\max}}$$

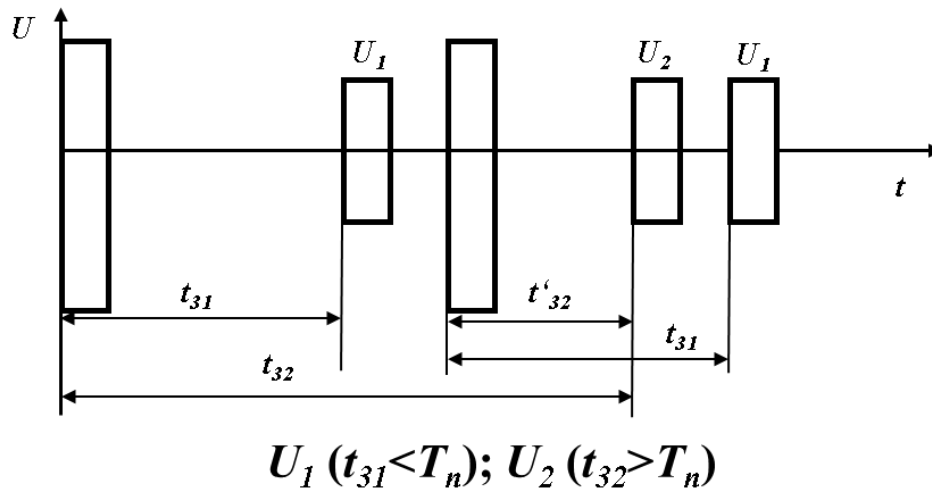


Рисунок 3.5. – Пояснення до неоднозначності виміру дальності [48, 49]

*Роздільна здатність по дальності.* Тривалість ЗС значно менша за період повторення цих імпульсів. Це дозволяє вимірювати дальність до багатьох цілей, котрі розташовані на одному напрямку. Таким чином імпульсний метод забезпечує розділення цілей по дальності і тим краще, чим менша тривалість імпульсу  $\tau_i$ . [48, 49]

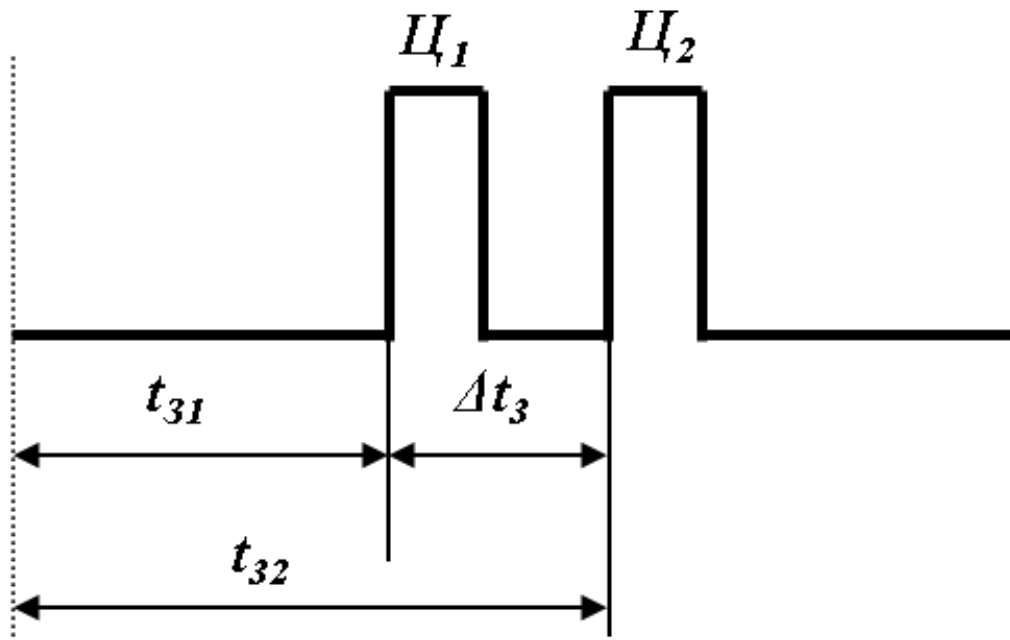


Рисунок 3.6. – Пояснення до роздільної здатності по дальності [48, 49]

$$\Delta t_3 = t_{32} - t_{31} = \frac{2(D_2 - D_1)}{C}$$

$$\Delta r = D_2 - D_1 \geq \frac{C\tau_i}{2}$$

$\Delta r = \frac{C\tau_i}{2}$  – потенціальна роздільна здатність.

Реальна роздільна здатність відрізняється від потенціальної і в загальному випадку залежить від ступеня спотворення форми імпульсу в приймаючій пристрій і індикаторі [48, 49].

Загальною мірою роздільної здатності є *роздільний об'єм* простору. При імпульсному методі зондування він називається *імпульсним об'ємом* і характеризує сумісну роздільну здатність по дальності і кутовим координатам [48, 49].

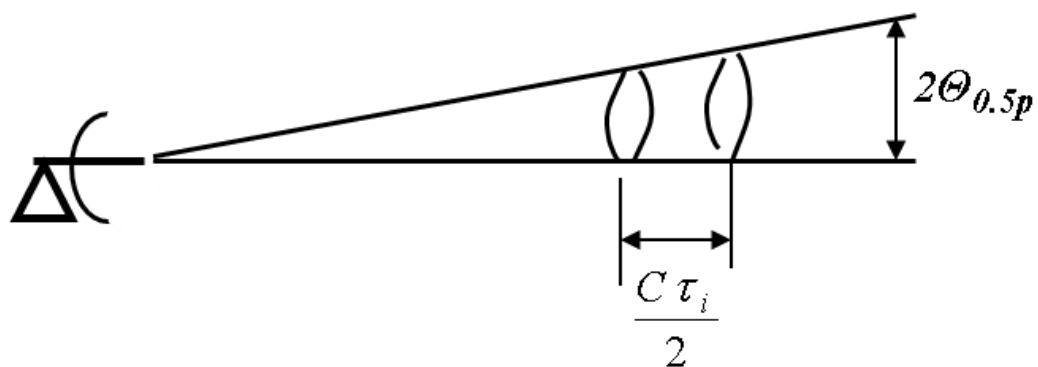


Рисунок 3.7. – Пояснення до роздільного об'єму

*Переваги та недоліки методу.*

*Переваги:* 1. Випромінювання ЗС і прийом відбитого від цілі сигналу рознесені у часі. Це дозволяє використовувати одну антенний пристрій на передачу та на прийом [48, 49].

2. Огляд по дальності і її вимірювання здійснюється водночас простими засобами [48, 49]..

3. Висока роздільна та інформаційна здатність РЛС [48, 49].

4. Простота створення імпульсних передавальних пристрійів і розв'язання приймально-передавальних трактів [48, 49]..

*Недоліки:* 1. З метою забезпечити великої дальності виявлення треба випромінювати велику імпульсну потужність, що обмежується можливим пробоем трактів каналізації зондувальних сигналів від передавальний пристрою до антени і пов'язано з використанням громіздких імпульсних модулюючий пристрійів [48, 49].

2. Обмежена можливість вимірювання малої дальності. Мінімальна дальність виявлення імпульсних РЛС визначається величиною [48, 49]:

$$D_{\min} = \frac{C(\tau_i + t_g)}{2}$$

де  $t_B$  – час відновлення чутливості приймаючий пристрою [48, 49]..

3. Неоднозначність вимірювання радіальної швидкості цілі, а також наявність явища “сліпих швидкостей” (усувається вобуляцією частоти повторення) і труднощів практичної реалізації системи селекції рухомих цілей [48, 49].

#### *Частотний метод дальнометрії.*

*Суть методу.* Частотний метод дальнометрії засновано на використанні в якості зондувального сигналу неперервних частотно-модульованих коливань. Визначення дальності до цілі засновано на вимірюванні прирощення частоти передавальний пристрою за час розповсюдження сигналу до цілі і назад, тобто за час затримки  $t_3$ . [48, 49].

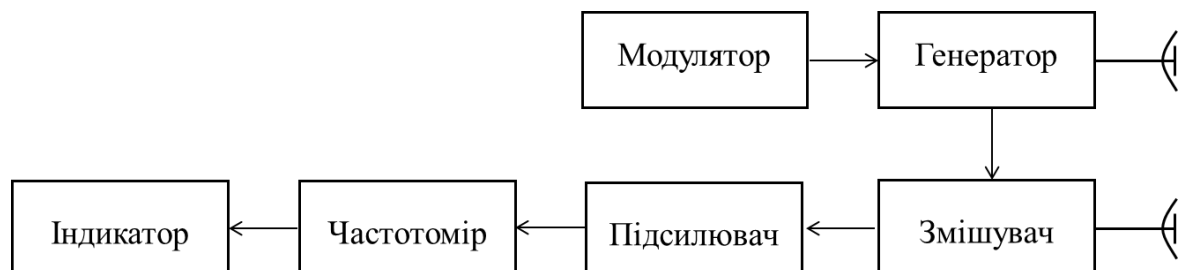


Рисунок 3.8. – Структурна схема простішого частотного радіолокатора [48, 49]

При лінійному змінюванні частоти ЗС  $f(t)=kt$ , де  $k$  – крутизна модуляційної характеристики генеруючого пристрою  $k = \Delta f_m / T_m = \Delta f_m F_m$ . Значення частоти прийнятого сигналу в момент порівняння відповідає  $f(t-t_3)=k(t-t_3)$ . В результаті змішування виділяється значення частоти биття  $F_{\delta}$ , котра дорівнює абсолютному значенню різниці миттєвих частот випроміненого і прийнятого сигналів [48, 49].

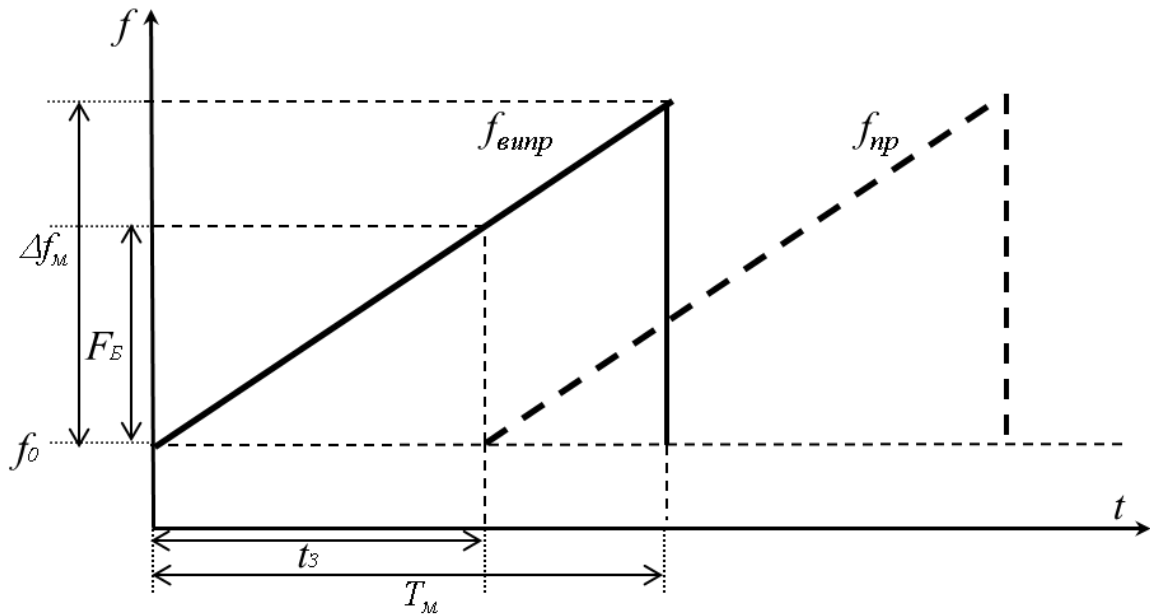


Рисунок 3.9. – Часові діаграми до структурної схеми частотної РЛС [48, 49]

$$F_B = |f(t) - f(t - t_3)| = |kt - k(t - t_3)| = kt_3 \rightarrow t_3 = \frac{F_B}{k},$$

а отже  $D = \frac{CF_B}{2k}$ .

*Переваги та недоліки методу.*

*Переваги:* 1. Великі можливості щодо підвищення енергетичного потенціалу в зв'язку з використанням неперервного випромінювання [48, 49]..

2. Можливість вимірювання дальності до цілі на дуже малих відстанях [48, 49]:

$$R_{\min} = \frac{C}{4\Delta f}$$

$2\Delta f$  – ширина смуги пропускання вимірювального фільтру [48, 49].

*Недоліки:* 1. Наявність двох антен і необхідність забезпечення високого ступеня їх розв'язки (до 80 дБ) [48, 49]..

2. Жорсткі вимоги до стабільності закону змінювання частоти [48, 49]..

*Фазовий метод дальнометрії.*

*Суть методу.* При фазовому методі дальнометрії в якості зондувального сигналу використовують неперервне немодульоване колювання. Час запізнення

$t_3$  має змогу визначатися шляхом вимірювання різниці фаз відбитого і випроміненого (опорного) сигналів [48, 49].

$U_1(t) = U_1 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0)$  – сигнал з виходу передавальний пристрою

$U_2(t) = U_2 \cos[2\pi f_0(t - t_3) + \psi + \varphi_0] = U_2 \cos[2\pi f_0 t - \varphi_3 + \psi + \varphi_0]$  – сигнал на вході приймаючий пристрою, де  $\varphi_3 = 2\pi f_0 t_3$  – запізнювання по фазі за рахунок кінцевого часу розповсюдження радіохвилі [48, 49].;

$\psi$  – стрибок фази коливання при відбитті від цілі [48, 49].;

$\varphi_0$  – початкова фаза випроміненого сигналу [48, 49].

Як видно, прийняті коливання відрізняються від опорних зсувом фази  $\varphi_3$ , котрий несе інформацію про дальність до цілі. Але практично цю інформацію виділити неможливо так як [48, 49].:

- невідома величина стрибка фази при відбиванні;
- однозначне визначення дальності можливо лише в діапазоні змінювання  $\varphi_3$  рівному  $0 \div 2\pi$ , що обмежує однозначне вимірювання дальності величиною  $D_{max} \leq \lambda/2$ , так як [48, 49]:

$$\varphi_3 = 2\pi f_0 t_3 = \frac{4\pi f_0 D}{C} \Rightarrow D_{одн} = \frac{C\varphi_3}{4\pi f_0} \leq \frac{C2\pi}{4\pi f_0} = \frac{C}{2f_0} = \frac{\lambda}{2}$$

Ці обмеження усуваються застосуванням двохчастотного радіолокатора.

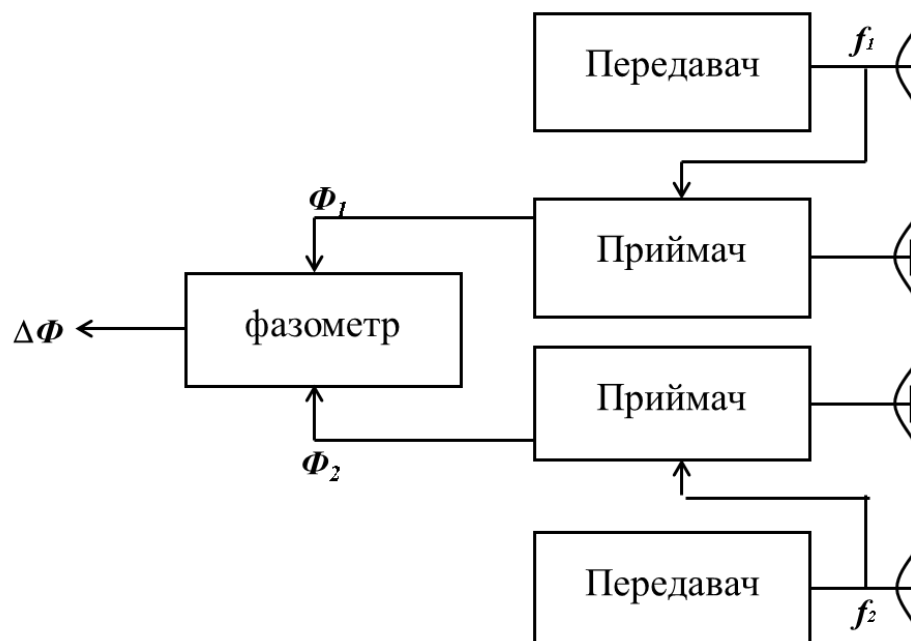


Рисунок 3.10. – Спрощена структурна схема двохчастотної фазової РЛС [48, 49]

Передавальний пристрій, що мають однакову потужність, працюють на близьких, але різних значення частот  $f_1$  і  $f_2$ . Вихідні сигнали приймаючий пристрій подаються на фазометр, котрий вимірює різницю фаз [48, 49]:

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2, \text{ де } \Phi_1 = 2\pi f_1 t_3 + \psi_1, \Phi_2 = 2\pi f_2 t_3 + \psi_2.$$

Оскільки різниця частот  $f_1$  і  $f_2$  незначна, то стрибки фаз при відбитті від цілі приблизно однакові тому [48, 49]:

$$\Delta\Phi = 2\pi(f_1 - f_2)t_3 = 2\pi(f_1 - f_2)\frac{2D}{C} = \frac{4\pi F_p D}{C}$$

де  $F_p = f_1 - f_2$  – різницева значення частоти. Тобто різниця фаз пропорційна дальності до цілі [48, 49]:

$$D = \frac{C\Delta\Phi}{4\pi F_p}.$$

Різницева частоту  $F_p$  вибирають з двох протирічних умов:

1. Необхідність забезпечення однозначності відліку дальності [48, 49]

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi F_p D}{C} \leq 2\pi \Rightarrow F_p \leq \frac{C}{2D_{\max}}$$

2. Необхідність виключення перехресного приймання сигналів приймаючий пристроєм  $F_p \geq \Pi$ , де  $\Pi$  – смуга пропускання приймаючий пристрій, котра вибирається за умов перекриття можливого діапазону доплерівських частот  $F_D$  і дорівнює  $\Pi = 2F_{D\max}$ . [48, 49].

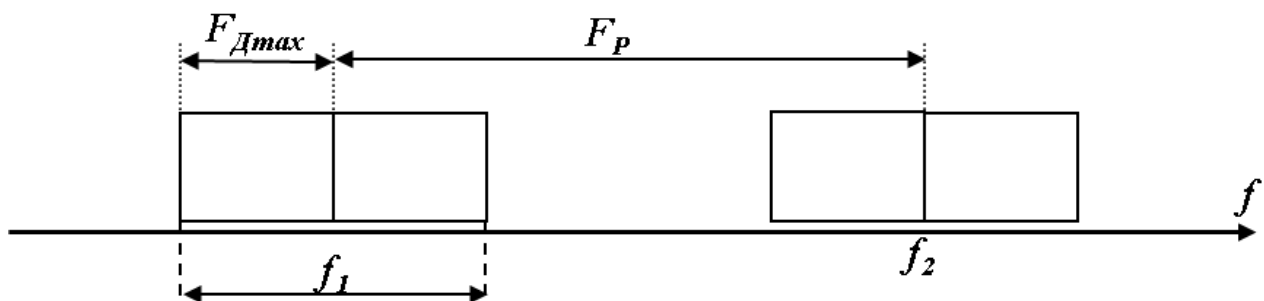


Рисунок 3.11. – Пояснення до вибору різницевої частоти  $F_p$  [48, 49]

З вищесказаного слідує, що різницева значення частоти повинна лежати у межах [48, 49]:



$$2F_{D \max} \leq F_p \leq \frac{C}{2D_{\max}}.$$

*Переваги та недоліки методу.*

*Переваги:* 1. Великі можливості щодо збільшення енергетичного потенціалу [48, 49]..

2. Відсутність “мертвої зони”, характерної для імпульсної РЛС [48, 49].

3. Простота вимірювання і порівняно мала апаратурна похибка [48, 49].

*Недоліки:*

1. Необхідність використання окремих антен на прийом і передачу [48, 49]..

2. Відсутність розділення по дальності (має змогу вимірювати дальність тільки однієї цілі) [48, 49].

***Методи вимірювання кутових координат.***

Процес вимірювання кутових координат називають *радіопеленгацією*. Пеленгація розв’язує задачі визначення двох координат або пеленгів цілі: азимуту  $\beta$ , і кута місця  $\varepsilon$  [48, 49].

Найважливішою характеристикою пеленгатора є його пеленгаційна характеристика (ПХ) - залежність амплітуди сигналу на виході приймаючий пристрою від кутового положення його антени відносно цілі [48, 49].

В залежності від того, який параметр радіосигналу створює основний вплив на формування ПХ, методи пеленгації поділяють на *амплітудні* і *фазові* [48, 49]..

При *амплітудному* методі кутове положення цілі (пеленг цілі) визначають за результатом аналізу амплітуди сигналу на виході одного або декількох каналів прийому [48, 49].

При *фазовому* методі пеленг цілі визначається за результатом порівняння фаз сигналів на виході декількох (мінімум двох) просторово рознесених каналів прийому [48, 49].

*Метод максимуму* - пеленг визначається напрямком максимуму ПХ в момент, коли амплітуда відбитого сигналу сягає найбільшої величини [48, 49].

Помилки вимірювання виникають через неточне визначення моменту максимуму і суттєво залежать від крутизни ПХ в точці відліку. *Недолік* - крутизна ПХ навколо точки максимуму ( $\theta_0$ ) низька, тому помилка вимірювання велика [48, 49].

*Перевагою* методу є простота і велике відношення сигнал/шум в момент відліку [48, 49].

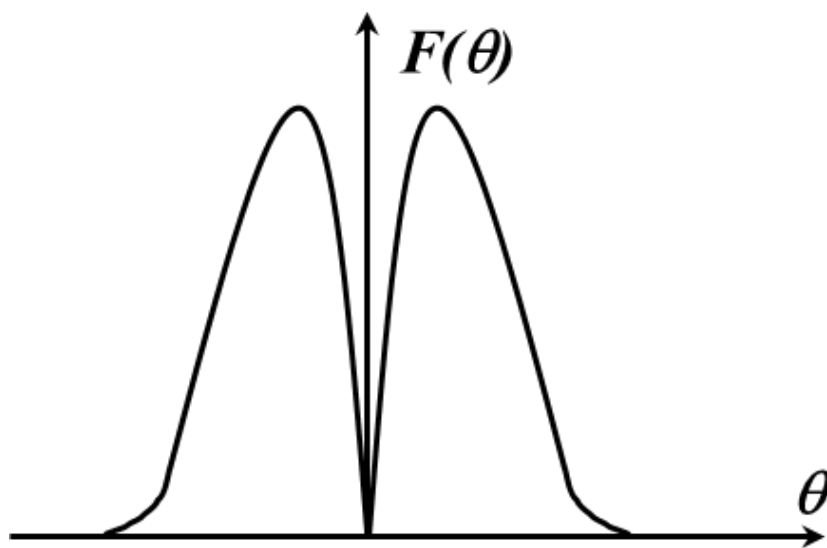


Рисунок 3.13. – ПХ для методу мінімуму [48, 49]

Пеленг відлічується по положенню антени в момент мінімального сигналу [48, 49].

*Недоліком* методу є мале значення відношення сигнал/шум в момент пеленгації.

*Перевагою* методу є більш висока точність вимірювання за рахунок великої крутизни ПХ в точці відліку [48, 49].

При методі “вилки” (порівняння) пеленг на ціль визначається як середнє двох відліків  $\theta_1$  і  $\theta_2$ , котрі відповідні однаковим значенням амплітуди сигналу на виході приймаючий пристрою при повороті антени в протилежні боки відносно напрямку на ціль [48, 49].

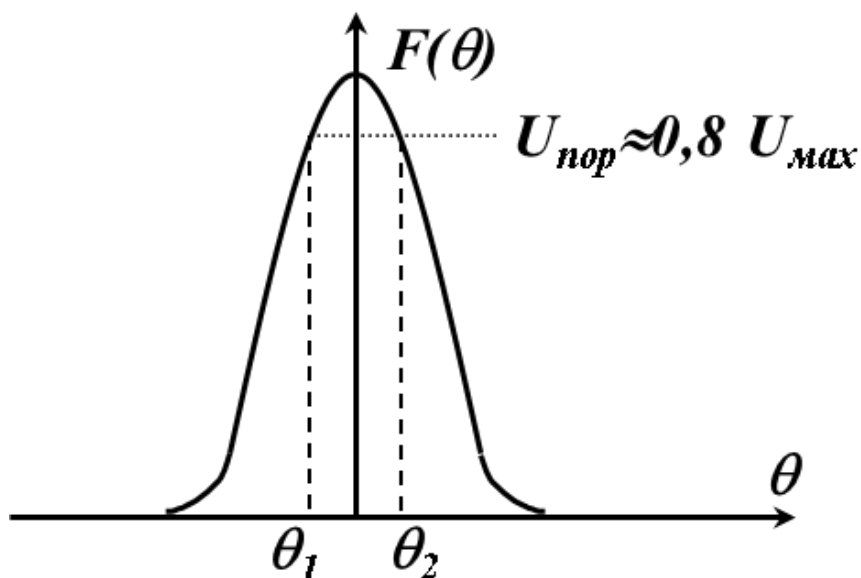


Рисунок 3.14. – ПХ для методу порівняння

В оглядових РЛС величини  $\theta_1$  і  $\theta_2$  визначаються на проході при рівності амплітуд сигналу вибраному значенню  $U_{пор}$ , яке звичайно встановлюється на рівні  $0,8U_{макс}$  [48, 49].

*Перевагою* методу є висока точність визначення пеленгу і порівняльне високе відношення сигнал/шум при вимірюванні [48, 49].

*Метод рівносигнального напрямку* – пеленг визначається, коли амплітуда сигналу відлуння в обох приймальних каналах однакова [48, 49].

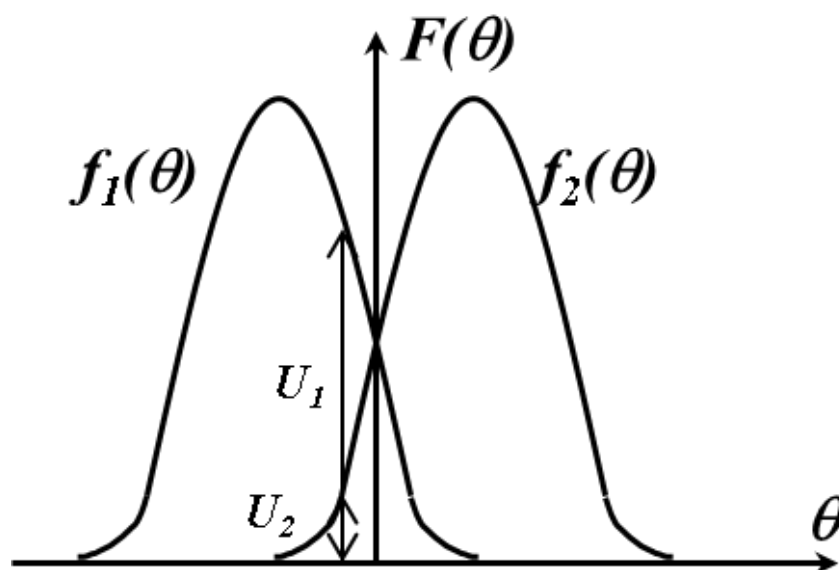


Рисунок 3.15. – ПХ для методу рівно сигнального напрямку [48, 49]

Метод використовується в РЛС супроводження цілей по кутовим координатам. Точність пеленгації аналогічна методу порівняння [48, 49].

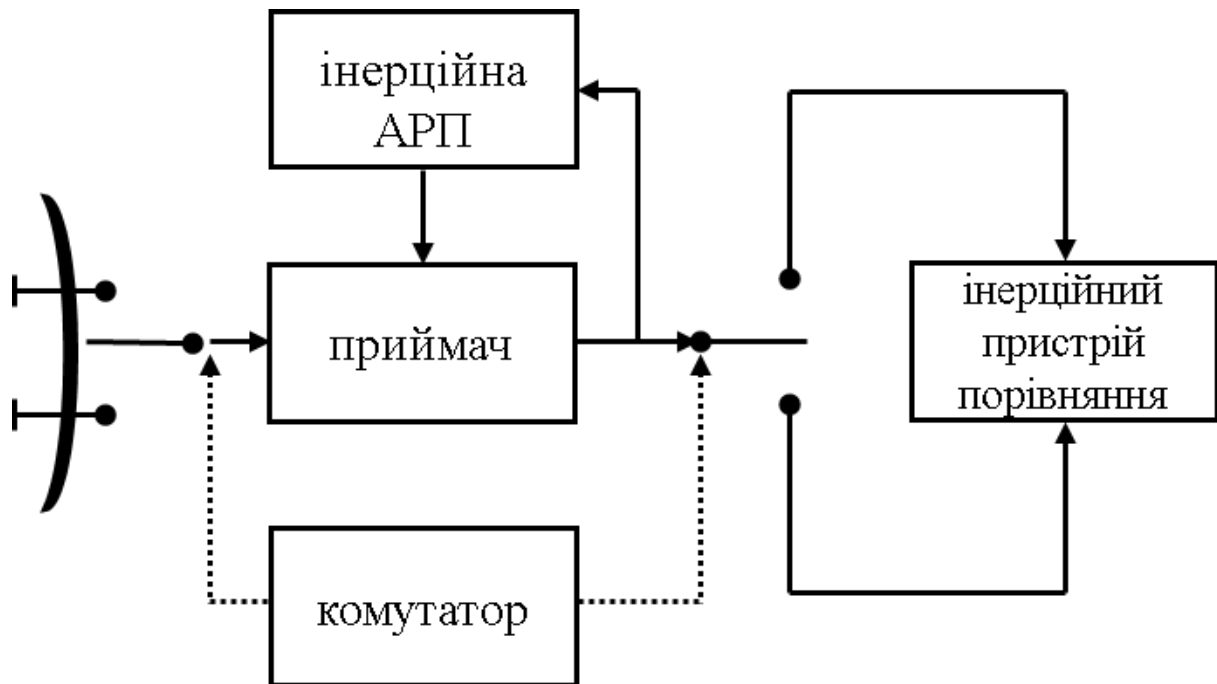


Рисунок 3.16 – Схема одно каналного пеленгатора побудованого по рівно сигнальному методу [48, 49]

Основним *недоліком* одноканальних пеленгаторів є те, що на точність пеленгації суттєво впливає флуктуація амплітуди сигналу відлуння.

Це обумовлено тим, що відлік кутів  $\theta_1$  і  $\theta_2$  відбувається в різні моменти часу [48, 49].

*Багатоканальні (моноімпульсні) амплітудні методи пеленгації.*

В багатоканальних пеленгаторах пеленг цілі визначається по результатам порівняння водночас тих чи інших параметрів сигналу на виході декількох (мінімум двох) каналів прийому [48, 49].

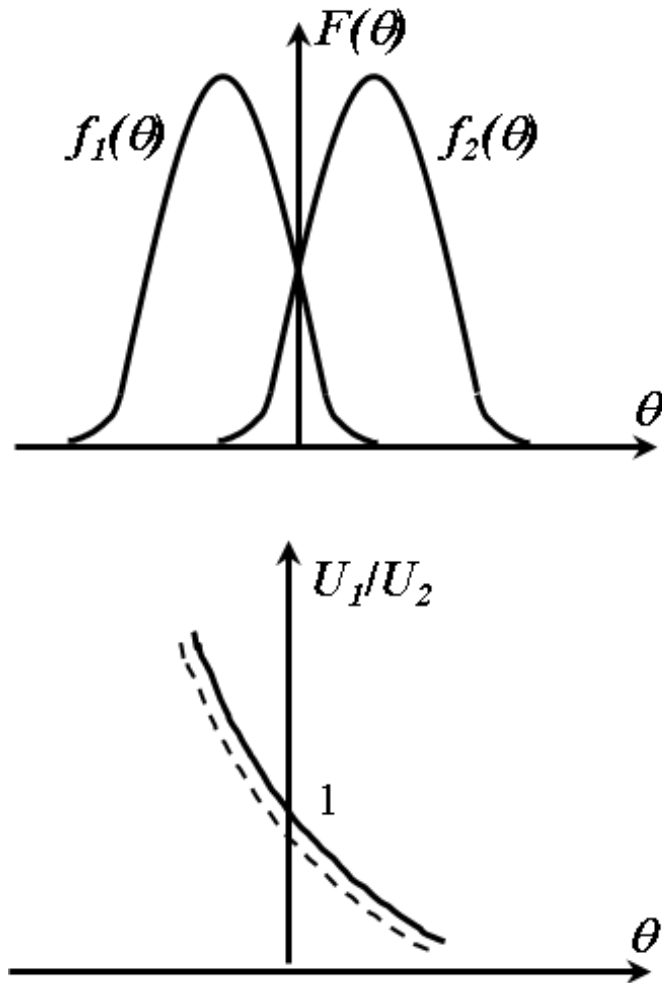


Рисунок 3.17. – ДН і ПХ моноімпульсного амплітудного пеленгатора (МАП)

Для порівняння амплітуд використовують два способи [48, 49].

*Перший* засновано на використанні підсилювача проміжної частоти з логарифмічною характеристикою і пристрою віднімання у якості схеми порівняння [48, 49].

*Другий* – на застосуванні схеми автоматичного регулювання підсилення охопленої одним з каналів прийому [48, 49].

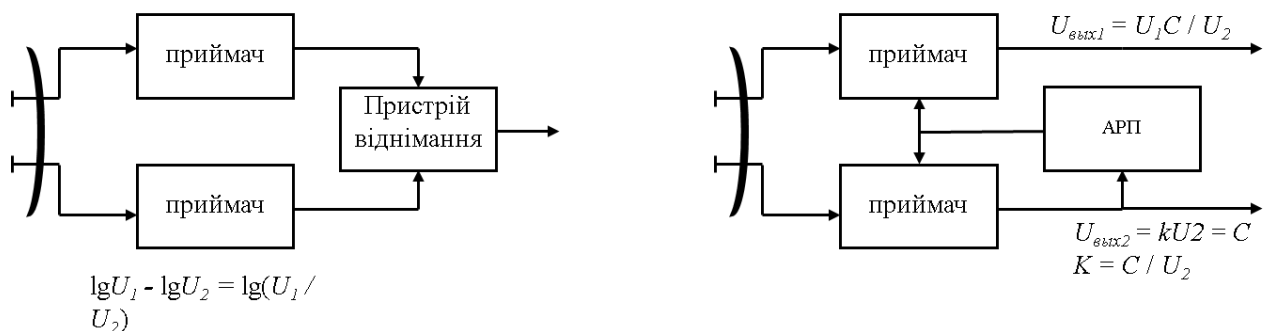


Рисунок 3.18. – Структурні схеми побудови МАП [48, 49]

Недолік – наявність додаткової помилки вимірювання за рахунок не ідентичності амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) прийомних каналів. Ця помилка викликає зсув рівносигнального напрямку (рис. 17 пунктир) [48, 49].

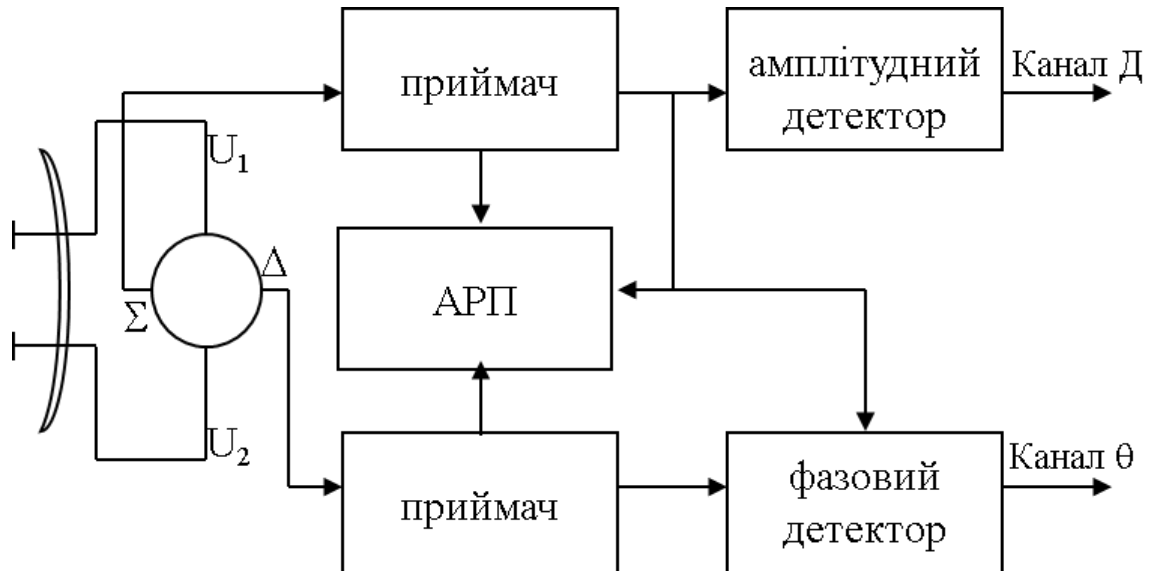


Рисунок 3.19. – Структурна схема МАП з сумарно-ріницевою обробкою сигналів [48, 49]

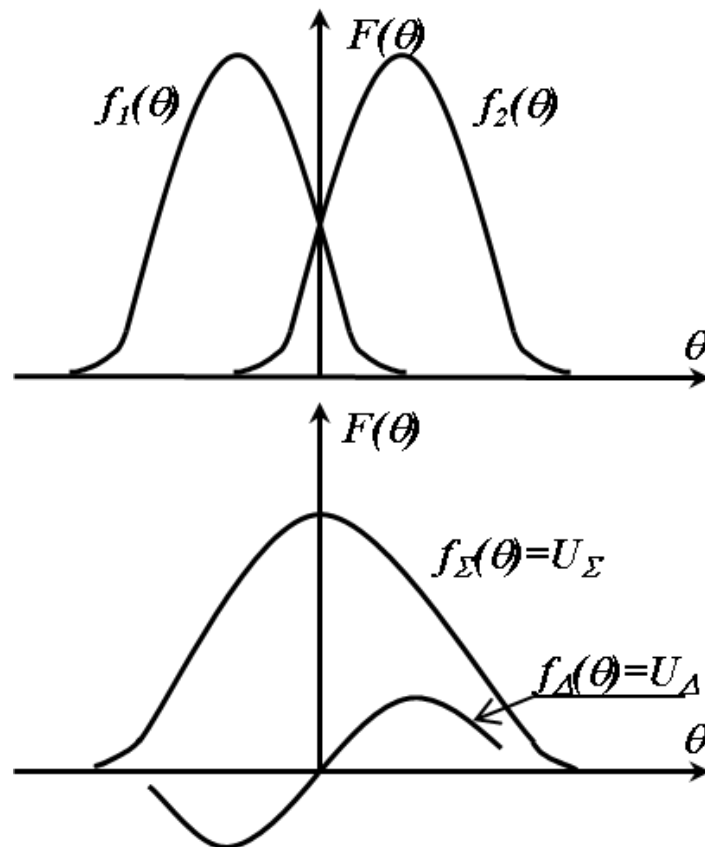


Рисунок 3.20. – ДН і сумарно-ріницева її характеристика [48, 49]

Нестабільність АЧХ каналів не приводить до зсуву РСН (рис.21 пунктир). Помилка вимірювання пеленгу сумарно-різницевого МАП залежить від пеленгаційної чутливості [48, 49].

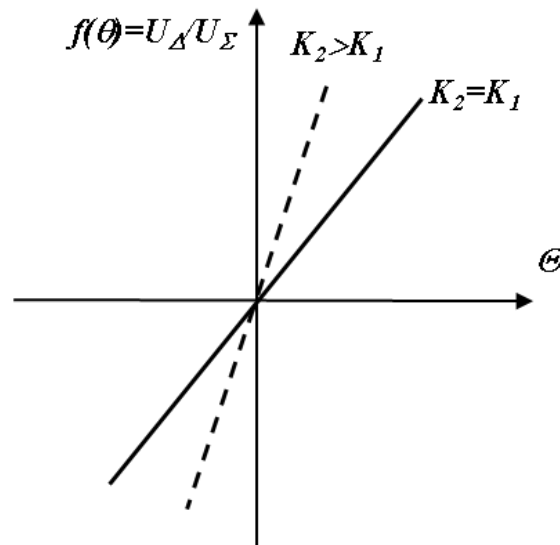


Рисунок 3.21. – ПХ сумарно-різницевого МАП [48, 49]

#### *Фазові методи пеленгації.*

Особливістю моноімпульсних фазових пеленгаторів є рознос фазових центрів антен приймальних каналів в просторі і збіг ПХ антен [48, 49].

Кутова координата цілі визначається різницею фаз коливань, прийнятих рознесеними в просторі антенний пристрійми, котра дорівнює [48, 49]:

$$\varphi \Delta = 2 \pi d \sin \theta / \lambda.$$

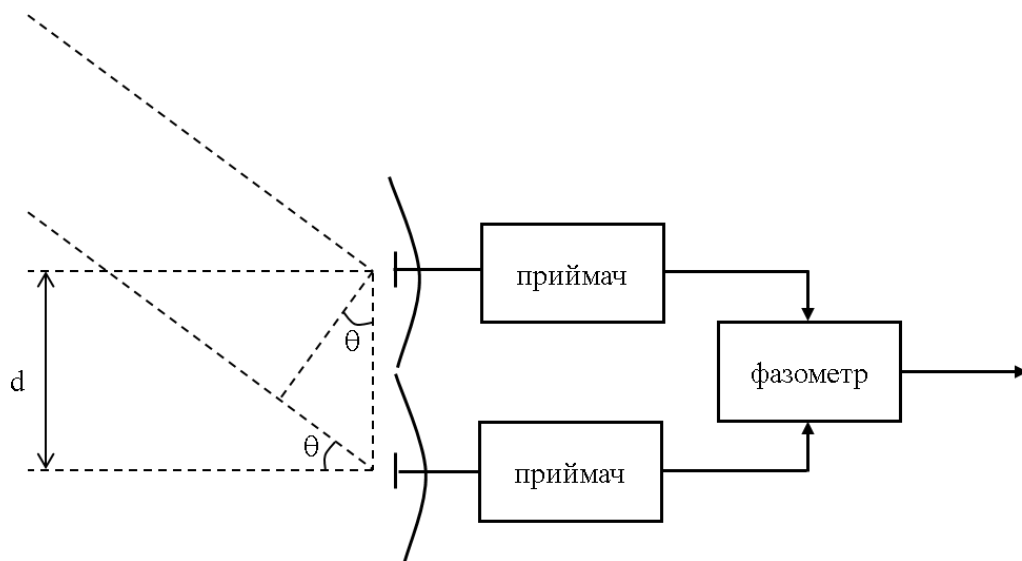


Рисунок 3.22. – Структурна схема моноімпульсного фазового пеленгатора (МФП) [48, 49]

Для однозначного визначення кутового відхилення необхідно, щоб відстань  $d$  між фазовими центрами антен дорівнювала розкриву антени. В такому випадку на входи приймаючий пристрій будуть поступати сигнали тільки від тих цілей, кутове відхилення котрих від РСН не перевищує половини ширини діаграми направленості антени [48, 49].

Зсув РСН, обумовлений тимчасовою взаємною нестабільністю фазочастотних характеристик (ФЧХ) приймальних каналів усувається застосуванням сумарно-різницевої обробки в МФП [48, 49].

### Методи вимірювання швидкості.

Амплітуда напруги на виході ФД має вигляд:

$$U_{\Phi D}(t) = \sqrt{U_1^2(t) + U_2^2(t) + 2U_1(t)U_2(t)\cos\Phi(t)}$$

де  $U_1(t)$  – сигнал з атенюатора (передавальний пристрою або опорний);  $U_2(t)$  – сигнал з виходу приймаючий пристрою;  $\Phi(t) = 2\pi F_D t + \varphi_0$  – різниця фаз коливань (для рухомої цілі)  $U_1(t)$  і  $U_2(t)$  [48, 49].

Таким чином, сигнал відбитий від цілі що рухається з виходу ФД, представляє собою коливання доплерівської частоти, для вимірювання якої використовується набір вузько смугових фільтрів, що налаштовані на різні  $F_D$  [48, 49]

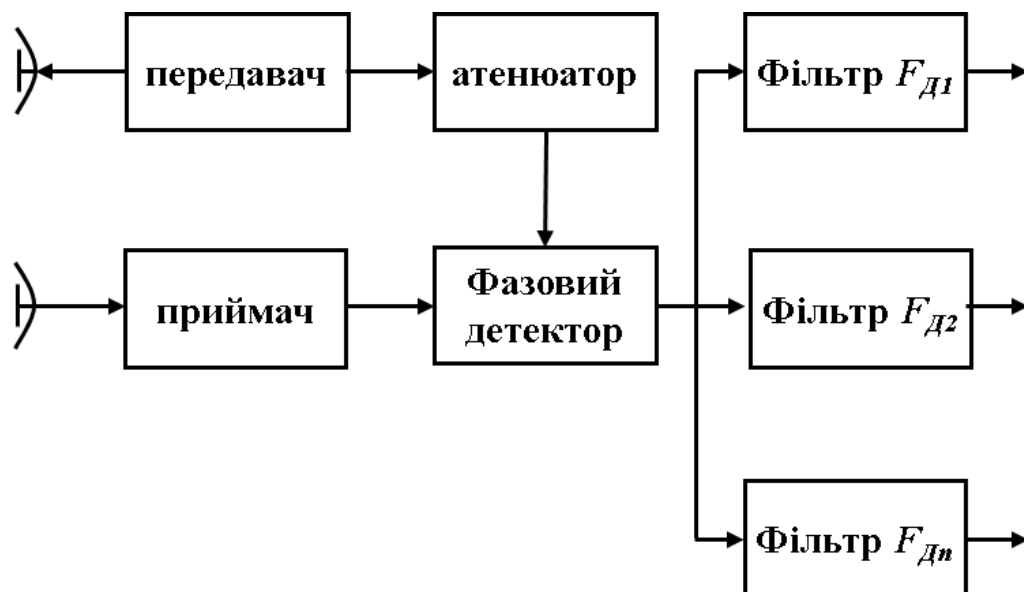


Рисунок 3.23. – Спрощена структурна схема доплерівського локатора [48, 49]



### 3.3.1. Мікропроцесорні первинні перетворювачі лінійно кутових величин на основі частоти сигналу

**Цифровий первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі миттєвих значень частоти.** У частотно-вимірній техніці основною характеристикою періодичного сигналу є період [46, 50, 51].

Періодом  $T$  періодичного сигналу називається найменший інтервал часу, через який регулярно послідовно повторюється довільно вибране миттєве значення періодичного сигналу  $u(t)$ . З математичної точки зору це інтерпретується так : період  $T$  – це найменший інтервал часу, що відповідає рівнянню  $u(t+iT)=u(t)$ , де  $i$  - будь-яке ціле число [46, 50, 51].

Принцип дії цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих значень частоти (рис. 3.24) заснований на квантуванні невідомого періоду сигналу  $T_x$  імпульсами зразкової частоти  $f_0$ , що їх формує зразкова міра частоти (ЗМЧ) [1, 30, 36, 46, 50, 51].

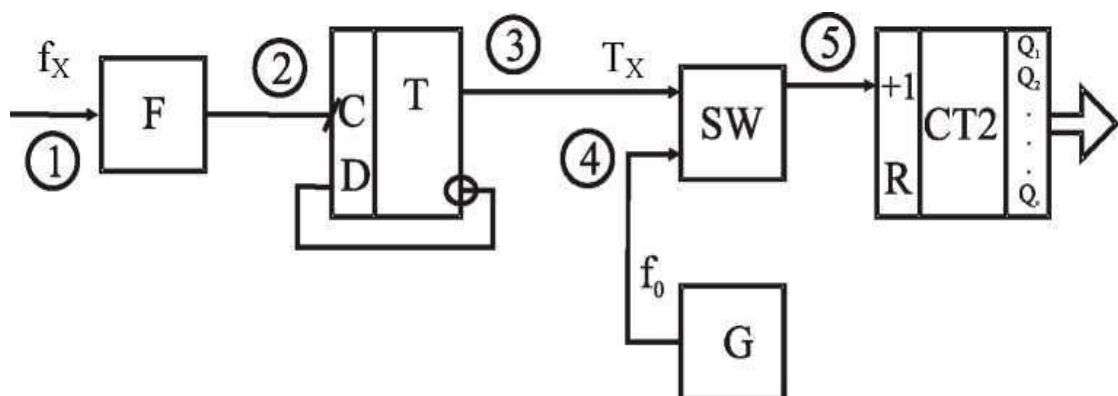


Рисунок 3.24. – Схема цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих значень частоти [1, 30, 36, 46, 50, 51]

Даний прилад пропонується застосовувати у складі вузлових пристроїв БСПС стандарту *ZigBee*. Для визначення відстані між вузловими пристроями пропонується метод *ToA – Time of Arrival*. [46, 50, 51]

В цьому випадку, відстань між двома вузловими пристроями безпосередньо пропорційна періоду  $T$ , який потрібен, щоб сигнал поширився

від одного пункту до іншого. Відстань між відправником і приймаючий пристроєм визначається за формулою методу *ToA – Time of Arrival* [46, 50, 51]

Основними елементами приведеної структури є формувач  $F$ , пристрій виділення періоду ПВП, генеруючий пристрій зразкової частоти  $G$ , схема збігу  $SW$ , двійковий лічильник  $CT2$ , перетворювач коду  $NT/Nf$  і цифровий відліковий пристрій. Калібровані за амплітудою і тривалістю імпульси з виходу формувача  $F$  надходять на вхід пристрою виділення періоду [46, 50, 51].

ПВП являє собою лічильний тригер  $T$ , на прямому виході якого з імпульсів із частотою  $f_x$  формується період  $T_x$ , що вимірюється. Період  $T_x$  у схемі збігу  $SW$  квантується імпульсами зразкової частоти  $f_0$ . [46, 50, 51]

Протягом кожного періоду  $T_x$  схема  $SW$  відкрита. Імпульси  $f_0$  із виходу генеруючого пристрою  $G$  через відкриту схему  $SW$  надходять на вхід лічильника  $CT2$ . Графік перетворення сигналів у блоках подано на рис. 3.25 [46, 50, 51].

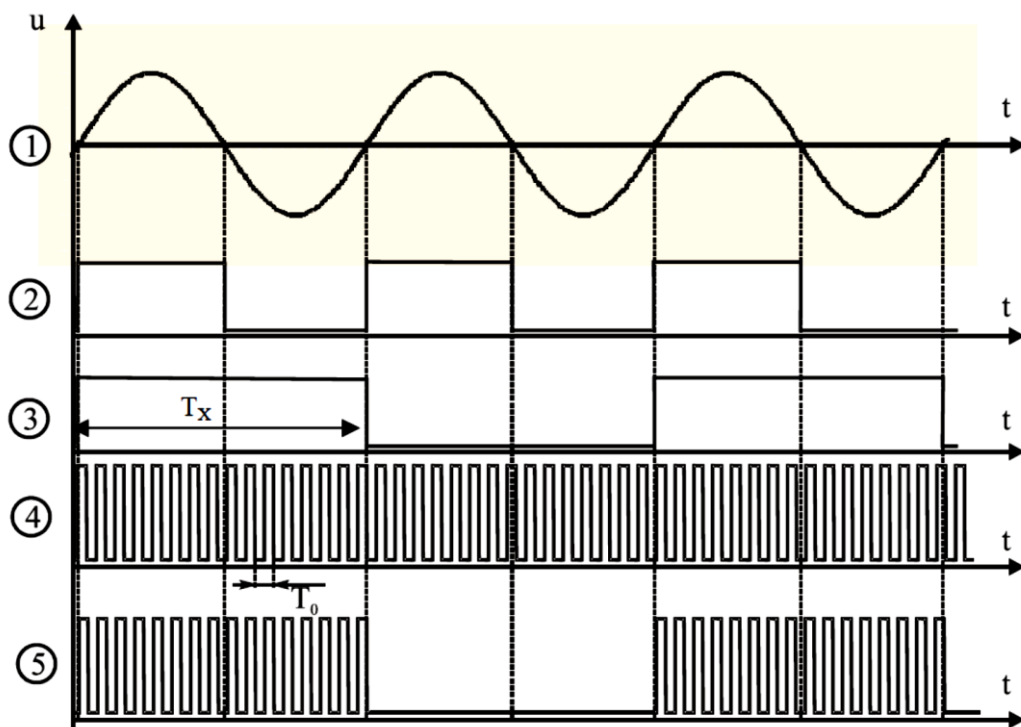


Рисунок 3.25. – Графік перетворення сигналів у блоках цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих значень частоти [46, 50, 51]

У лічильнику після закінчення кожного періоду  $T_x$  формується код [50, 51].

$$N_T = \int_{t_1}^{t_2} T_0 dt = \frac{T_x}{T_0} = T_x \cdot f_0 = \frac{f_0}{f_x}$$

Останнє співвідношення є рівнянням перетворення цифрового цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих значень частоти [46, 50, 51].

**Цифровий первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі середніх значень частоти.** Значення частоти  $f$  періодичного сигналу (між  $t_1$  і  $t_2$ ) – це фізична величина, значення якої визначають кількістю коливань в одиницю часу. Принцип дії цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі середніх значень частоти, засновано на підрахунку кількості імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий часовий інтервал  $t_0$ , який формується зразковою мірою часу. Структурну схему цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі середніх значень частоти наведено на рис.3.26, а часові діаграми його роботи – на рис. 3.27 [46, 50, 51].

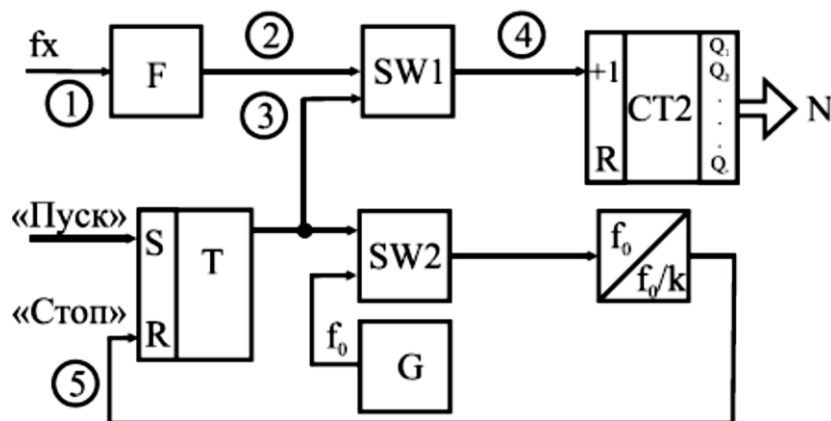


Рисунок 3.26. – Цифровий первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі середніх значень частоти: Т - RS - тригер, SW2 - схема збігу, G – генеруючий пристрій зразкової частоти, ПЧ - подільник частоти, що формує зразковий часовий інтервал  $t_0$  [50]

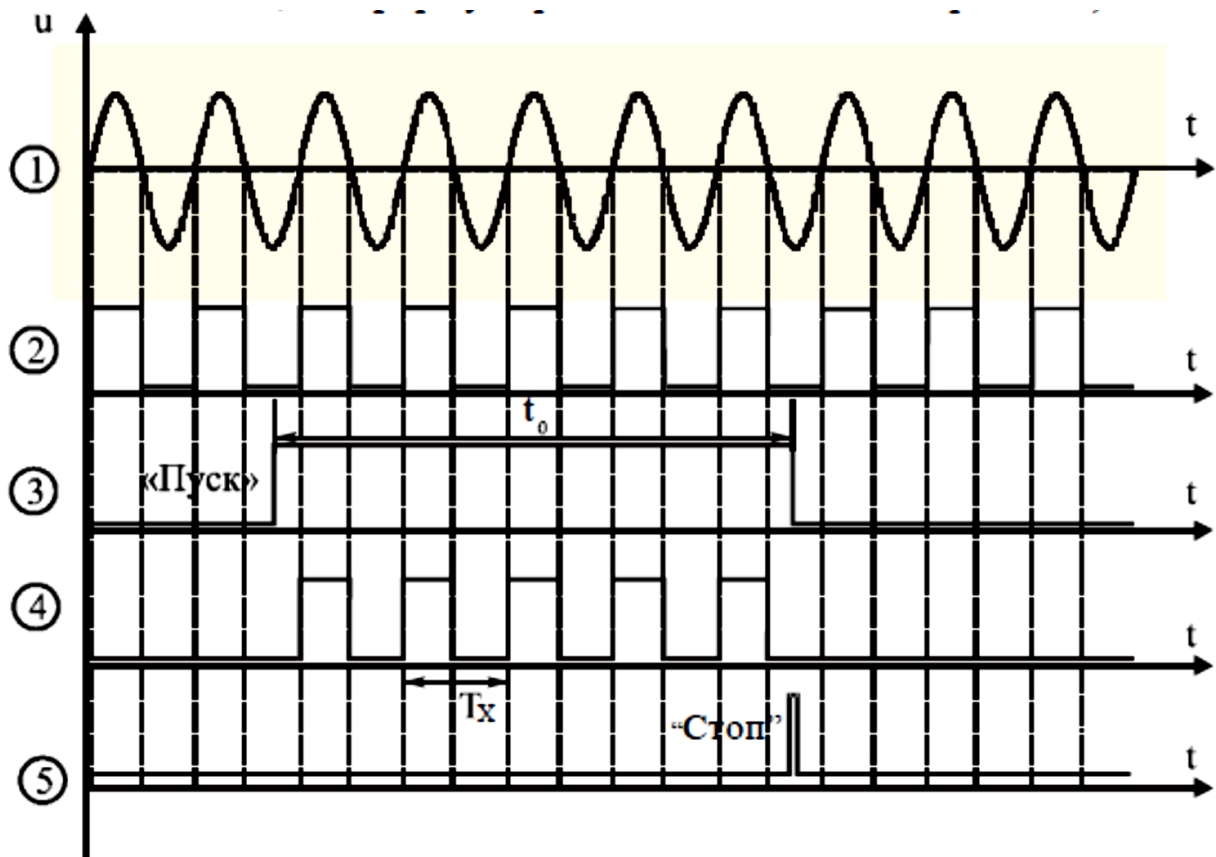


Рисунок 3.27. – Часова діаграма роботи цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі середніх значень частоти [50, 51].

Схема містить двійковий лічильник  $CT2$ , який підраховує кількість імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий інтервал часу  $t_0$ , схема збігу  $SW1$ , де здійснюється квантування зразкового часового інтервалу імпульсами невідомої частоти, формувач імпульсів  $F$ , який із входніх синусоїдних сигналів формує прямокутні імпульси, калібровані за амплітудою і тривалістю [36, 37, 50, 51].

За командою "Пуск" тригер  $T$  приймає стан логічної одиниці і таким чином відкриває схеми збігу  $SW1$  і  $SW2$ . Імпульси, які проходять із частотою  $f_x$  через формувач  $F$  і відкриту схему  $SW1$ , надходять на вхід двійкового лічильника  $CT2$ , який здійснює їх підрахунок [36, 37, 50, 51].

В цей самий момент часу через відкриту схему  $SW2$  імпульси  $f_0$  із виходу генеруючого пристрою  $G$  зразкової частоти надходять на вхід подільника частоти, коефіцієнт ділення якого розраховують з урахуванням забезпечення потрібного часового інтервалу  $t_0$ . Після закінчення зразкового часового

інтервалу заднім фронтом імпульсу  $t_0$  тригер  $T$  встановлюється у стан логічного нуля, схеми збігу  $SW1$  і  $SW2$  закриваються і в лічильнику  $CT2$  фіксується код  $N$ . Кількість імпульсів невідомої частоти, які підраховує двійковий лічильник за час  $t_0$ , визначається так [46, 50, 51]:

$$N_i = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{t_0}{T_x} = t_0 f_x$$

де  $t_1$ ,  $t_2$  – моменти часу початку та закінчення зразкового часового інтервалу. Зразковий часовий інтервал формується в подільнику частоти і визначається як [46, 50, 51]

$$t_0 = kT_0,$$

де  $k$  – коефіцієнт ділення подільника частоти;  $T_0$  – період імпульсів зразкової частоти  $f_0$ . Тоді остаточне рівняння перетворення цифрового ППЧС середніх значень матиме вигляд [46, 50, 51]:

$$N_F = kT_0 F_x = \frac{k f_x}{f_0}.$$

Подане співвідношення є рівнянням перетворювання цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі середніх значень частоти, оскільки воно характеризує, яким чином мають зв'язок між собою вихідна  $N_F$  і вхідна  $f_x$  величини [50, 51]..

**Мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі частоти.** Алгоритм роботи мікропроцесорного первинного перетворювача, що дозволяє досліджувати періодичні процеси у широкому діапазоні, наведено на рис.3.28 [46, 50, 51].

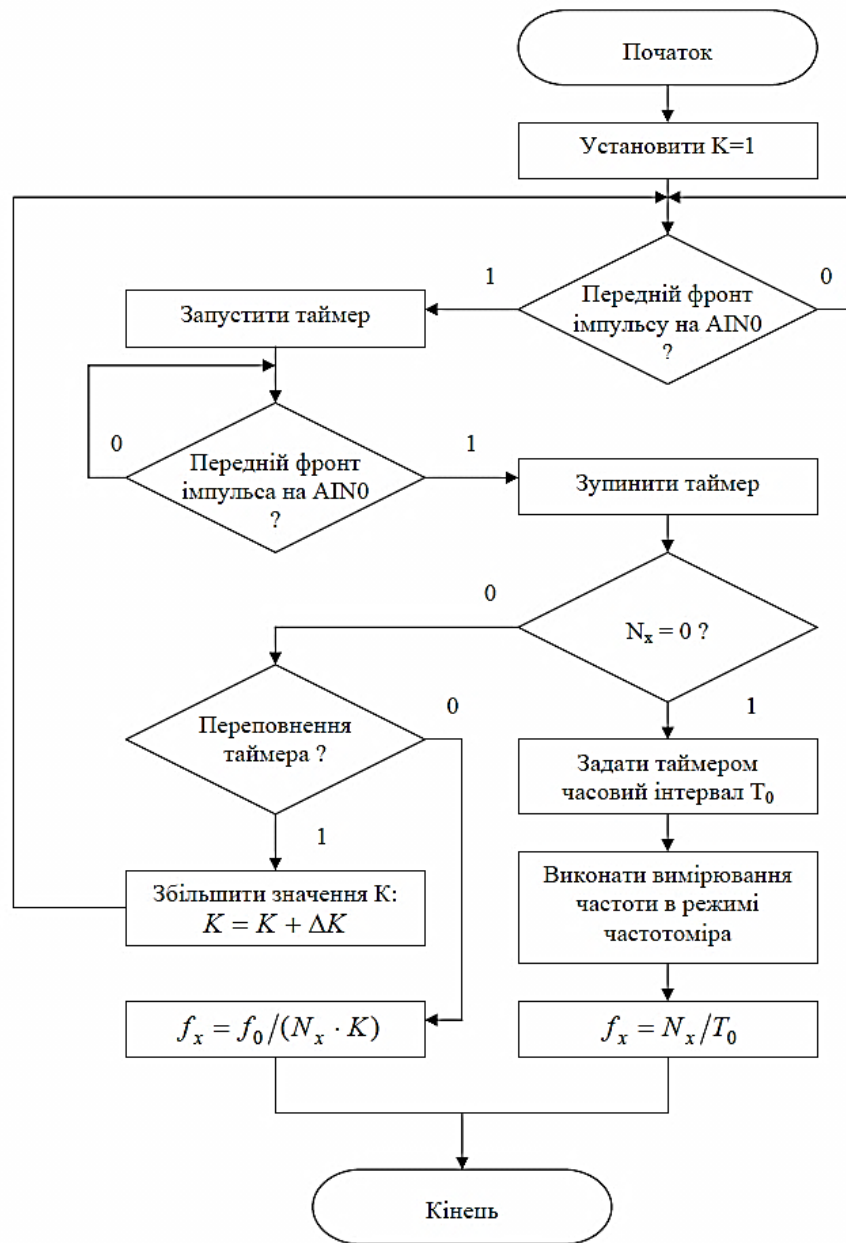


Рисунок 3.28. – Алгоритм роботи мікропроцесорного первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі частоти [50, 51]

Спочатку настраюють програму на режим ПППерС. Встановлюють коефіцієнт подільника частоти  $K=1$  і проводять вимірювання невідомої частоти  $f_x$ . Вимірювана значення частоти подається на вхід аналогового компаратора [46, 50, 51].

Аналоговий компаратор вибраний з тієї причини, що він має досить гнучку програмну обробку інформації: програміст має змогу вибрати пряму програмну обробку або обробку за перериванням. За переднім фронтом імпульсу на вході

$AIN0$  аналогового компаратора запускають таймер на рахування імпульсів  $f_0/K$ . За наступним переднім фронтом імпульсу на вході  $AIN0$  аналогового компаратора (після закінчення періоду  $T_x$ ) таймер мікроконтролера зупиняють і підраховують кількість імпульсів  $N_x$ . Якщо  $N_x = 0$  (значення частоти  $f_0$  недостатня для спрацювання ПППерС), то задають за допомогою таймера часовий інтервал  $t_0$  (як у випадку 3,  $t_0=1$  сек) і переходять в режим вимірювання частоти. Частоту обчислюють за формулою  $f_x = N_x/T_0$ . Якщо  $N_x \neq 0$ , то перевіряють переповнення таймера мікроконтролера. При невиконанні цієї умови обчислюють частоту, інакше збільшують коефіцієнт подільника частоти  $K = K + \Delta K$  і повертаються до вимірювання періоду. Частоту обчислюють за формулою  $f_x = f_0/(N_x \cdot K)$  [38, 46, 50, 51].

Структурна схема первинно перетворювача, яка дозволяє реалізувати наведений алгоритм, подана на рис. 3.29 [38, 46, 50, 51].

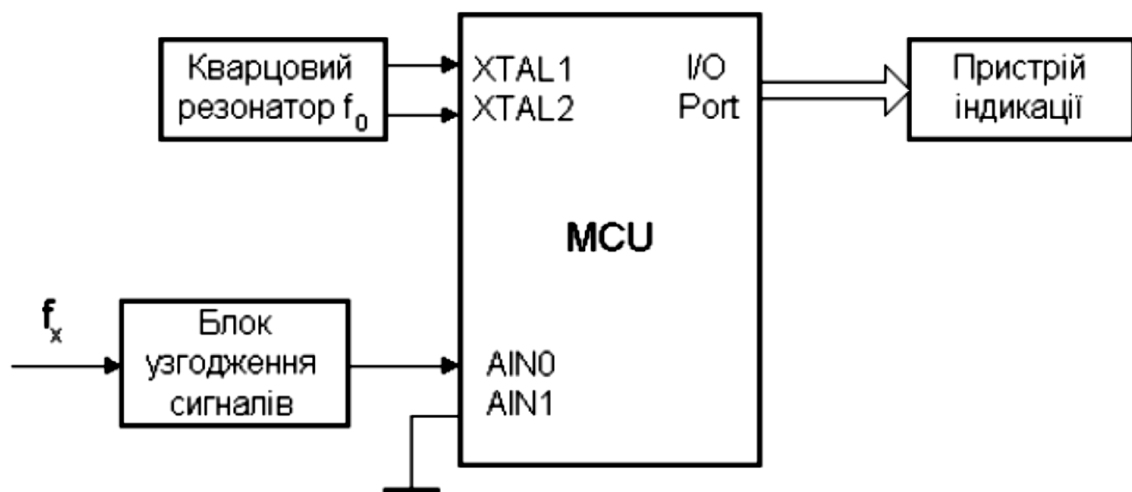


Рисунок 3.29. – Мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі частоти [50, 51]

### 3.3.2. Мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі фази сигналу

Принцип дії мікропроцесорного первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі фази ґрунтується на перетворенні різниці фаз радіо та ультразвукового сигналу, з часом прибуття  $t_1$  і  $t_2$ , що мають напругу  $u_1$  і  $u_2$  у ча-

совий інтервал  $t_x$  з його наступним квантуванням імпульсами зразкової частоти  $f_0$ . На рис. 3.30 наведено алгоритм його роботи [46, 50, 51].

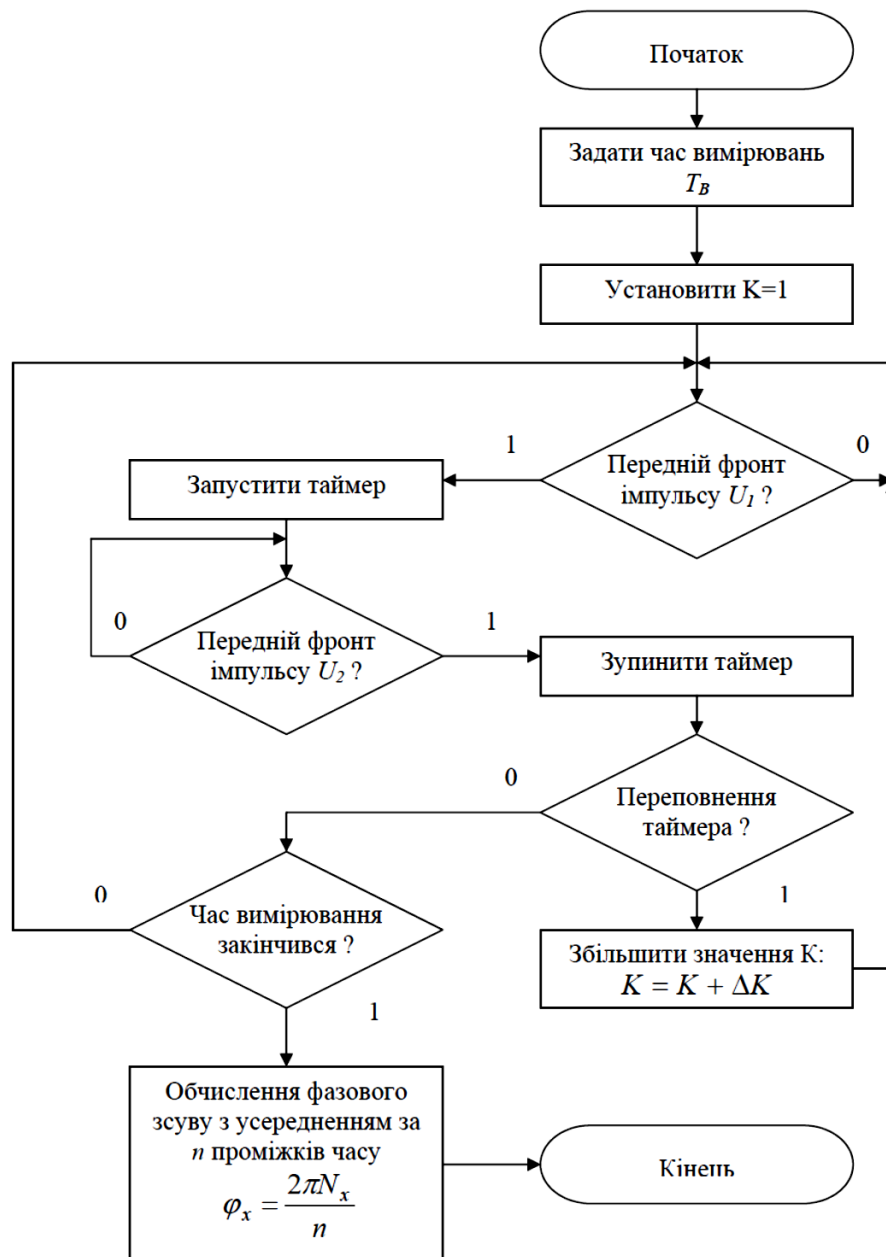


Рисунок 3.30. – Алгоритм роботи мікропроцесорного первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі фази [50, 51]

Основними елементами приладу є блоки узгодження сигналів  $u_1$  і  $u_2$ , мікроконтролер  $MCU$ , кварцовий резонатор частотою  $f_0$  і пристрій індикації. Перед початком вимірювань встановлюють час вимірювань  $t_B$  і коефіцієнт подільника частоти  $K=1$  [46, 50, 51].



У момент переходу напруги  $u_1$  через рівень нуля запускають таймер на рахування імпульсів  $f_0/K$ . Рахування проходить до переднього фронту імпульсу напруги  $u_2$ . При цьому робота таймера зупиняється, і підраховують кількість імпульсів  $N_x$ . Кількість імпульсів усереднюється в проміжку часу [39, 46, 50].

$$t_B = n \cdot f_x.$$

При виникненні переповнення таймера збільшують коефіцієнт подільника частоти [46, 50]

$$K = K + \Delta K$$

і повертаються на початок вимірювань. Зсув по фазі обчислюють за формулою

$$\varphi_x = \frac{2\pi N_x}{n}$$

На рис.3.31 наведено його структурну схему [46, 50, 51].

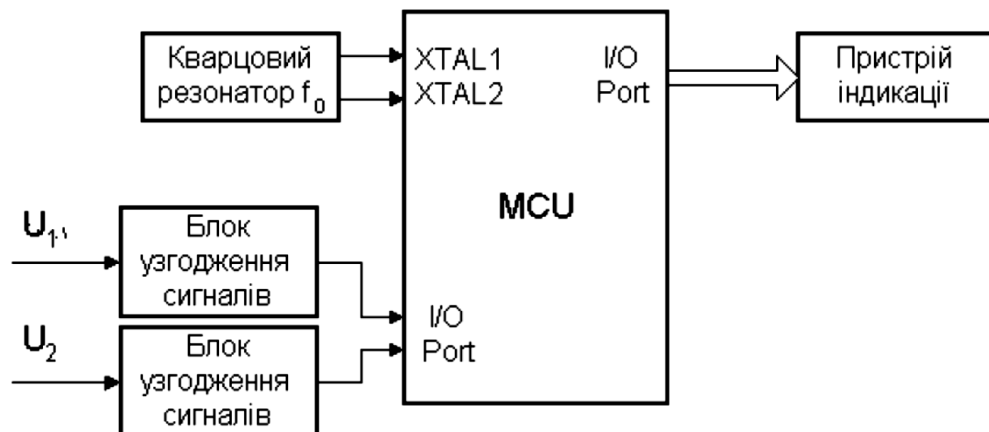


Рисунок 3.31. – Мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі фази [50, 51]

### 3.4. Мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-кутових величин на основі потужності сигналу

Серед всіх фізичних величин дуже важливе місце має електрична потужність, що являє собою загальні властивості в якісному відношенні для електричних кіл та енергетичних систем, їх станів і процесів, які в них протікають,

але також в кількісних відношеннях індивідуальна для кожного електричного кола, приймаючий пристрою та джерела енергії [42].

Енергія надвисоких частот широко застосовується в різноманітних галузях промисловості, зокрема при контролі параметрів, налаштуванні та ремонті НВЧ-апаратури та в системах зв'язку GSM, CDMA, Bluetooth. Потребується вимірювання або контролювання енергетичних параметрів сигналів з використанням різних методів, реалізованих у вимірювачах потужності НВЧ – сигналів. Фактично всі вони засновані на еквівалентному перетворенні енергії вихідних електромагнітних коливань в інший вид енергії, зручний для вимірювання [42]. Сучасні вимірювачі потужності дозволяють проводити вимірювання таких потужнісних параметрів: середня, імпульсна, пікова потужність, відношення пікової та середньої потужності [42]. НВЧ – хвилі поширюються не лише у самому провіднику (кабелі чи смужковій лінії), але і просторі навколо нього, що в результаті зумовлює необхідність враховувати в проектуванні НВЧ – перетворювача геометричних особливостей та електромагнітної сумісності [40, 7, 42].

Надвисокочастотні вимірювання – вимірювання характеристик поля НВЧ – діапазону (потужність, щільність потоку, поляризація). Ефективність приймально–передавальних пристроїв залежить від коливального контуру, що розташований в вихідному каскаді пристрою. Майже всі пристрої НВЧ використовують модуль (датчик), що перетворює НВЧ – коливання в сигнал, що досліджується [41, 42]. Для цього існує декілька видів, реалізованих у вимірювачах потужності НВЧ – сигналів (табл. 1)[42].

Таблиця 3.1

Методи вимірювання потужності НВЧ – сигналів

Метод	Параметр вимірювання
Пондеромоторний	Прохідна потужність
Спрямованих відгалужувачів	Модуль коефіцієнту відбиття
Калориметричний	Поглинаюча потужність
Поглинаючої стінки	Апроксимована прохідна потужність
Багатозондовий	Навантаження прохідної потужності
На ефекті Холла	Прохідна потужність

За способом під'єднання до передавального тракту класифікують ватметри проходящого типу та поглинаючого. Перші представляють собою чотирьохполюсник, в якому поглинається невелика частина загальної потужності. Другі, що представляють собою двухполюсник, підключаються на кінці передавальної лінії, і в ідеальному випадку в ньому поглинається вся потужність падаючої хвилі [42].

Окрім цього є основні види перетворювачів, такі як:

- терморезисторні;
- термопари;
- діодні детектори [42].

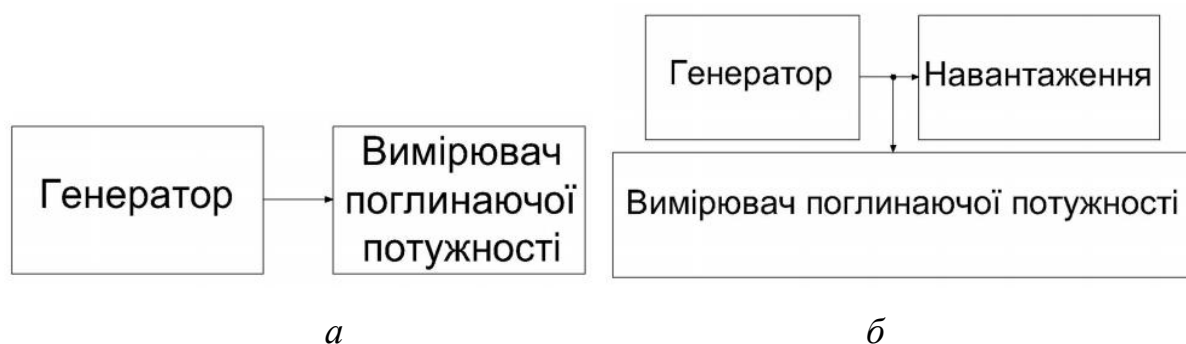


Рисунок 3.31. – Способи вимірювання потужності ватмертом: а – поглинаючого типу; б – проходячої потужності.

Кожному типу перетворювача притаманні свої переваги, функціональні можливості та обмеження в застосуванні [42, 43].

Основна задача проектування перетворювача потужності полягає у перетворенні потужності надвисокочастотного каналу в постійний струм або сигнал низької частоти, що вимірюються та перераховуються з урахуванням калібрувальних даних детектора в значення потужності сигналу [42].

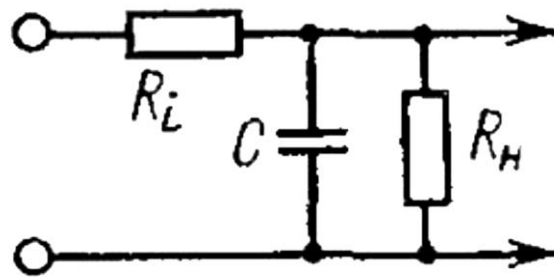
Вимірювання, мають зв'язок з використанням терморезисторів або термопар оцінюють теплову потужність сигналу НВЧ, що розсіюється на чутливому елементі і можуть безпосередньо вимірювати середню потужність і їм притаманний малий динамічний діапазон [42].

Широкопasmові перетворювачі на діодних детекторах дозволяють вимірювати потужність НВЧ-коливань з високою роздільною здатністю по часу,

оскільки вони дозволяють оцінювати середнє значення на інтервалах, що багаторазово перевищують період повторень сигналу [42].

Діодний детектор випрямляє НВЧ – сигнал та проводить інтегрування результату на ФНЧ. Основною перевагою діодного перетворювача є чутливість, що дозволяє вимірювати такі низькі рівні потужності, як 100 пВт, так і високі, до 10 кВт [42].

Для зменшення напруги, що поступає на діод використовується ємнісний зв'язок (Рис. 3.32) [42].



Рисункок 3.31. – Еквівалентна схема ємнісного зв'язку діодного датчика [42]

Напруга подається на діод та випрямляється, а опір навантаження шунтується конденсатором, напруга на якому перераховується в значення імпульсної або середньої потужності. В процесі роботи конденсатор заряджається при потраплянні імпульсу і розряджається в проміжках між ними. Заряд проходить швидше розряду у зв'язку з тим, що внутрішній опір діода менший за опір навантаження. Протягом періоду напруга на ємності стає постійною і процес вважається встановленим [42].

Особливістю або недоліком останнього типу вимірювань є притаманна нелінійність закону перетворення, має зв'язок з нелінійними властивостями діоду. У зв'язку з цим, при побудові алгоритмів вимірювань у лінійному вигляді важливим є лінеаризація датчиків – перетворювачів НВЧ [42].

Для неперервного гармонічного сигналу нелінійність має змогу бути скоригована для отримання істинного середньоквадратичного значення потужності. Якщо розкласти рівняння, що описує поведінку діода в ступеневий ряд, то побачимо, що випрямлене значення вихідної напруги є функцією

квадрату напруги вхідного сигналу до рівня сигналу, що відповідає потужності не більш ніж - 20 дБм [42].

В такому динамічному діапазоні вихідна напруга пропорційна значенню рівня вихідної потужності. Ця нелінійність безперервного гармонійного сигналу має змогу бути скоригована задля виведення істинного середньоквадратичного значення потужності [42].

При перевищенні цього значення потужності процес випрямлення стає більш лінійним, а вихідна напруга переходить до функції вхідної напруги. Це призводить до появи обмежень при використанні перетворювача на діодному детекторі при вимірюванні параметрів потужності імпульсно-модульованих сигналів [42].

На Рис. 3.21 показано взаємозв'язок імпульсної і середньої потужності. У прикладі використаний простий імпульс тривалістю 10 мкс з періодом повторення 40 мкс, отже, різниця імпульсної і середньої потужності дорівнює 6,02 дБ. Дана величина має змогу бути внесена до вимірювача як величина компенсації ослаблення, щоб на дисплеї відображалася імпульсна потужність (діюче значення потужності імпульсів) [42].

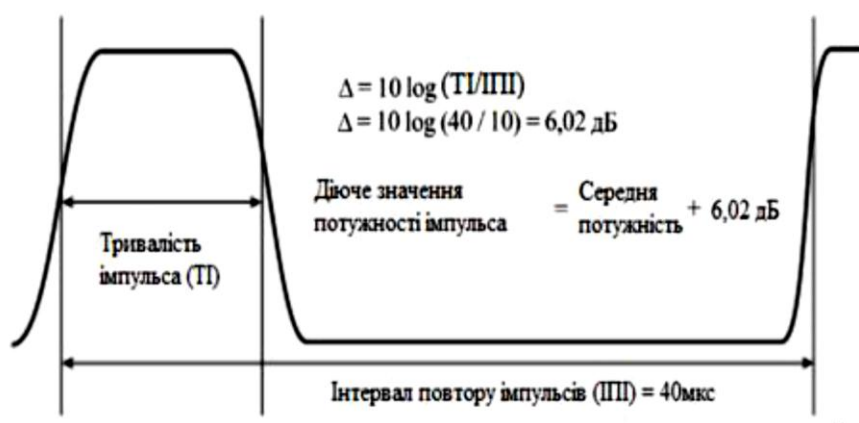


Рисунок 3.32. – Використання вимірювача середньої потужності для визначення імпульсної потужності [42]

Для цього доцільним є використання мікроконтролерного керування в вимірювачі НВЧ – потужності. Основне призначення МК у вимірювачі НВЧ - потужності – це обробка вимірюваних даних та керування процесом вимірю-

вання. При цьому до МК пред'являються певні вимоги: наявність аналого-цифрового перетворювача (перетворює вхідну напругу в цифровий сигнал), МК повинен мати необхідну обчислювальну потужність, забезпечувати виведення результату. Нелінійність датчиків обробляється цифровим способом. Отже можна обійтись без важких схемних рішень при обчисленні необхідної величини [42]. Прикладом такого портативного вимірювача НВЧ потужності є пристрій на основі МК ATmega 128. Антенний пристрій приймає НВЧ випромінювання і попадає на термістор вимірювальної головки (ввімкнена в резистивний міст Уітстона. В результаті збалансований міст розбалансовується та сигнал подається на інструментальний підсилювач, що знаходиться в МК. З виходу МК перетворені дані передаються в незалежну пам'ять, перетворюються в відповідні коди та виводяться на екран [42].

Після вимірювань можна передати дані із зовнішнього пам'яті через інтерфейс УАПП МК в комп'ютер, але спочатку необхідно узгодити рівні між МК і послідовним портом (COM) комп'ютера. Для МК необхідні п'ятівольтні рівні. Для цих цілей застосовується мікросхема перетворення рівнів MAX 232 [42].

У даній роботі передбачається використовувати вимірювальний перетворювач М5 - 38, призначений для вимірювання малої потужності НВЧ в хвильоводних трактах П-подібного перетину. Цей перетворювач має наступні основні характеристики: діапазон частот перетворювача 3,64-16,7 ГГц, максимальна вимірювана потужність 10 мВт, коефіцієнт ефективності перетворювача в діапазоні частот дорівнює 1 (похибка 6% ), коефіцієнт стоячої хвилі входу перетворювача 1,5, чутливість перетворювача не менше 5 Ом / мВт. При подачі СВЧ потужності на перетворювач частина потужності не поглинається термістором, а відбивається за рахунок неповного узгодження перетворювача з іншим вимірювальним трактом. Потужність, що підводиться до перетворювача дорівнює [42]:

$$P_{\text{под}} = \frac{P_{\text{мосту}} (1 + |\Gamma_T|^2)}{\eta}$$

де  $P_{pod}$  – потужність, що подається на вхід;  $P_{мосту}$  – потужність, яка вимірюється вихідним ватметром термісторного моста;  $\eta$  – коефіцієнт ефективності перетворювача [42].

Вимірювання характеристик термистора в вимірювальній голівці показали, що залежність НВЧ потужності від напруги розбалансу моста на частоті 2,4 ГГц має лінійний характер [42, 46, 50, 51]. Перспективним рішенням є поєднання такого вимірювального детектора потужності НВЧ – сигналу з датчиком, що має змогу бути проінтегрований для застосування з комп’ютерними засобами обробки інформації (USB - датчик) [42, 46, 50, 51]. До їх складу входить НВЧ – детектор, пристрій корекції передаточної характеристики з навантаженням, аналогово – цифровий перетворювач, узгоджений інтерфейс [42, 46, 50, 51]. Прикладом перетворювача потужності є AD7750 – мікросхема перетворювача добутку напруг в частоту слідування імпульсів (Product to Frequency Converter) із похибкою менше 0.3%, розроблена фірмою Analog Devices. На рис. 3.33 наведено структурну схему мікросхеми AD7750 [46, 50, 51].

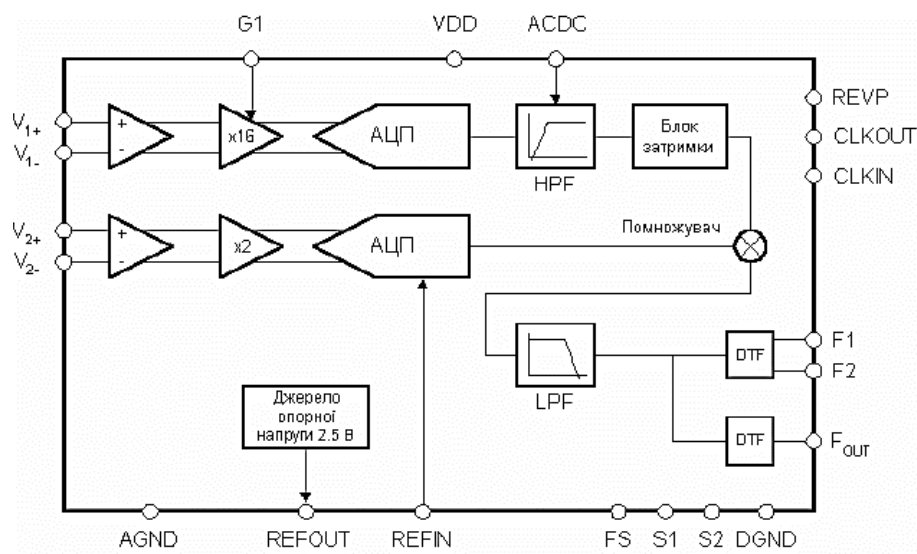


Рисунок 3.34. – Мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-кутових величин на основі потужності [50]

Входи каналів струму та напруги є диференціальними. Кожен вхід призначений для напруги не більше 1 В [46, 50, 51].

Поточний канал, до якого надається отримана потужність –  $Pr(d)$  (див. формулу 2.2), має підсилювач з перемінним підсиленням  $Gr$  (1 або 16), що імітує потужність роботи приймальної антени, йому протиставлений (відповідно до нульового методу) канал напруги, до якого подається передана потужність, –  $Pt$ , містить підсилювач з коефіцієнтом посилення  $Gt = 2$ , що імітує передавальну антенний пристрій. Після підсилення обидва сигнали перетворюють АЦП в числовий код і множать. Високочастотні компоненти фільтруються за допомогою цифрового фільтра низьких частот LPF, потім код живлення надходить у перетворювач частоти (Digital to Frequency Converter, DTF) [46, 50, 51].

Щоб зменшити похибку вимірювання потужності внаслідок присутності постійного компонента струму в нейтральному дроті, ви маєте змогу включити поточний режим фільтрації з фільтром високих частот HPF [44, 45, 46, 50, 51].

### **Висновки до розділу 3**

1. Запропоновано рекомендації щодо покращення технічних характеристик БСПС, шляхом додаткового застосування в пристроях БСПС цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу.

2. Проаналізовано принцип роботи цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу, та виявлено, що різницю часу між ультразвуковим та радіосигналом, яка використовується для визначення відстані між об'єктами, можна визначити, за різницею періодів цих сигналів.

3. Побудовано математичну модель роботи цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу.

4. Розроблено структурну схему цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу, з урахуванням математичної моделі.



5. Обґрунтовано застосування методу вимірювання відстані між об'єктами на основі порівняння потужності відправленого та прийнятого сигналів.

6. Запропонована структурна схема пристрою для вимірювання потужності відправленого та прийнятого сигналів.

7. Визначено, що буває чимало способів дослідження інтенсивності електричних сигналів. Види цих способів залежать від тих ознак класифікації, що характеризують діапазон частот, спосіб добутку фізичних величин, особливості навантаження тощо.

8. Запропоновано застосування пристрою вимірювання середнього значення потужності НВЧ – сигналів, побудованого за принципом використання діодного детектору та мікроконтролерного керування для налаштування та контролю НВЧ – пристроїв, у тому числі в цілях використання в приладах вимірювання відстані на основі падіння потужності сигналу.

### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Дуднік А. С. Аналіз методів вимірювання відстаней між об'єктами за допомогою сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №3. С. 213 -216. (РИНЦ, ScholarGoogle, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)

2. Boukerche A., Nakamura E. Localization systems for wireless sensor networks [Текст]. IEEE Wireless Communications Special Issue on Wireless Sensor Networks, 2007. – P. 6–12

3. He T., Huang C., Blum B. Range-free localization schemes for large scale sensor networks [Текст] // In MobiCom '03: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, New York, 2011, ACM Press, New York. – P. 81–95. 83.

4. Derivation of Friis Transmission Formula [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>. The Friis Equation – Назва з титул. екрану.

5. Savvides A., Han C. Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors [Текст] // In 7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2010. – P. 166–179.
6. Дуднік А.С. Методи визначення відстані між об'єктами сенсорних мереж [Текст] /А.С. Дуднік // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 17. С. 40 -49. **(Norwegian Register for Scientific Journals, BASE, Citefactor, GIF, SIS)**
7. Дуднік А.С. Визначення відстані між об'єктами на основі часу прибуття сигналу [Текст] / А. С. Дуднік // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 18 – 20 квітня 2018 р.: тези допов. – Кам'янець-Подільський., 2018. – С. 25 – 26.
8. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice, 4th edition [Текст] // Springer-Verlag, Berlin. – 2003.
9. Elson J. Time synchronization in wireless sensor networks [Текст] // Department Computer Sciences, University of California, Ph.D. dissertation, Los Angeles. – 2003.
10. Whitehouse K. The design of calamari: An "кожен з кожним" localization system for sensor networks [Текст] // M.S. thesis, University of California at Berkeley. – 2009.
11. Priyantha N., Balakrishnan H., Teller.S. The cricket compass for context aware mobile applications [Текст] // In 7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy, July 2006. – P. 325.
12. Дуднік А.С. Методи визначення координат на основі дальності сигналу та обчислення позиції розташування у пристроях сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 10 – 12 травня 2018 р.: тези допов. – Чернігів., 2018. – С. 173.
13. Golub G., Van Loan C. Matrix Computations [Текст] // 3rd edition, Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD. – 2010. – P. 213.

14. Квасніков В.П. Математична модель локалізації об'єктів за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] / В.П. Квасніков, А.С. Дуднік // Технічне регулювання, метрологія та якість: виклики сучасності: IX Всеукраїнська наук.-практ. конф., 17 – 18 травня 2018 р.: тези допов. – Одеса., 2018. – С. 59 -60.

15. . Квасніков В.П. Наукові основи визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] /В.П. Квасніков, А.С. Дуднік// Метрологія та прилади . – 2018. – Вип. № 3. – С.21 -26. (**Index Copernicus**)

16. Boukerche A., Oliveira H. Towards an integrated solution for node localization and data routing in sensor networks [Текст] // In ISCC '07: 12th IEEE Symposium on Computers and Communications, Aveiro, Portugal, July 2007. – P. 449–454.

17. Boukerche A., Oliveira H., Nakamura E., A novel location-free greedy forward algorithm for wireless sensor networks [Текст] // In Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications (ICC 2008), Beijing, China, May 2008.

18. Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks [Текст] // In Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '08), Boston, MA, August 2008, ACM Press, New York, P. 56–67.

19. Brooks R. R., Iyengar. S. S. Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications [Текст] / R. R. Brooks, S. S. Iyengar // Prentice Hall, Englewood Cliffs. –NJ. – 2009. – P. 120.

20. Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks [Текст] // In Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and

Networking (MobiCom '00), Boston, MA, August 2008, ACM Press, New York, P. 56–67.

21. Yu Y., Govindan R., Estrin D.. Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks [Текст]. Technical Report CSD-TR-01-0023, UCLA Computer Science Department, 2011.

22. Boukerche A., Oliveira H. Towards an integrated solution for node localization and data routing in sensor networks [Текст] // In ISCC '17: 22th IEEE Symposium on Computers and Communications, Aveiro, Portugal, July 2017. – P. 449–454.

23. Niculescu D., Nath B. "кожен з кожним" positioning system (aps) using aoa [Текст] // I Proceedings of INFOCOM 2003, San Francisco, CA. – 2009. – P. 238.

24. Дуднік А.С. Вимірювання локації об'єктів за допомогою сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: міжнар. наук.-практ. конф., 14 – 19 травня 2018 р.: тези допов. – Івано-Франківськ., 2018. – С. 24 – 27.

25. Sichitiu M., Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon [Текст] // In Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile "кожен з кожним" and Sensor Systems (MASS 2010), FL, October 2010. – P. 174–183.

26. Simic S., Sastry S. Distributed localization in wireless "кожен з кожним" networks. [Текст] // Technical Report UCB/ERL M02/26, UC Berkeley. – 2003.

27. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice, 4th edition [Текст] // Springer-Verlag, Berlin. – 2003.

28. Savvides A., Han C. Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors [Текст] // In 7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2010. – P. 166–179.

29. Whitehouse K. The design of calamari: An "кожен з кожним" localization system for sensor networks [Текст] // M.S. thesis, University of California at Berkeley. – 2009.

30. Dudnik A. Method for measuring the distance between objects using a digital frequency measuring device [Текст] / A.Dudnik // European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2018. # 4. P. 19 -24. (**ULRICHSWEB, BASE, EBSCO, eLIBRARY.RU, OpenAIRE, RePEc, ROAR, WorldCat**) (Vienna, Austria)

31. ИвановЕ.В., КозловВ.Н., КурикшаВ.А., "Экспериментальное определение ошибки измерения расстояний между устройствами стандарта IEEE802.15.4 [Текст] / ZigBee", "Радиолокация и Связь"(журнал в журнале), 2008г

32. В.С.Шебшаевич, "Сетевые спутниковые радионавигационные системы" [Текст]/, Изд-во "Радиоисвязь", 1993

33. Jan Blumenthal, Ralf Grossmann, Frank Golasowski, Dirk Timmermann, Weighted Centroid Localization in Zigbee-basedSensor Networks [Текст]/, University of Rostock, 2012

34. N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, "GPS-less low cost outdoorlocalization for very small devices" [Текст]/, IEEE Personal CommunicationsMagazine, 7(5):28–34, October 2000.

35. Дуднік А.С. Метод вимірювання відстані між об'єктами за допомогою цифрового частотоміра миттєвих значень [Текст] / А.С. Дуднік // Метрологія та вимірювальна техніка: ХІ міжнар. наук.-практ. конф., 9 – 11 жовтня 2018 р.: тези допов. – Харків., 2018. – С. 94.

36. Кухарчук В.В. Метрологія та вимірювальна техніка. Навчальний посібник. [Електронний ресурс] /В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, В.П. Долгополов, Л.В. Грумінська // Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. 252с. – режим

доступу:

<http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/2716/000137.pdf?sequence=1>

37. Дуднік А. С. Метод вимірювання відстані між об'єктами в сенсорних мережах за допомогою цифрового частотоміра середніх значень [Текст] // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2018. — №13. С. 45 - 49. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-13-4031> (**РИНЦ, ScholarGoogle, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus**)

38. Дуднік А.С. Розробка мікропроцесорного частотоміра для комп'ютеризованих систем вимірювання відстані [Текст] /А.С. Дуднік // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. № 1. – С.162 -167.

39. Дуднік А.С. Метод вимірювання відстані між об'єктами сенсорних мереж засобами мікропроцесорного фазометра [Текст] /А.С. Дуднік // Технічні науки та технології. – 2018. Вип. № 2(12). С. 136 -141. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-136-141](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-136-141) (**Index Copernicus, OJS, ResearchBib, WorldCat, BASE РИНЦ**)

40. Овчарук А. А., Фазовий аналогово – цифровий перетворювач НВЧ – діапазону [Текст] /, Вісник ХНУ – 2011, №5, – с. 155.

41. Зацепін П. М. Вимірювач потужності НВЧ випромінювання на основі мікроконтролера [Текст] /,— 2010, – с. 112.

42. Цимбал О.О. Вимірювання середньої потужності НВЧ - перетворювача [Електронний ресурс] / О.О. Цимбал, Ю.О. Грамарчук, доц. М.М. Кобак // Матеріали XI-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 6-7 квітня 2017 р. Режим доступу: <http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/conferences/2017/2017-254-258.pdf>

43. Білокурсський Ю. П. Сучасний стан та перспективи розвитку вимірювачів параметрів сигналів та трактів високого рівня потужності НВЧ – діапазону.

44. Загородній А. С., Визначення імпульсної потужності сигналів НВЧ за допомогою вимірювача середньої потужності [Текст] /, 2011 р., Доклади ТУСУРа, 2, ст. 241.

45. Dudnik A. Development microprocessor device measuring power for computer systems measure the distance [Текст] / A.Dudnik // Sciences of Europe. – 2018. # 28. Vol. 1. P. 64 -68. **(DIIF, eLIBRARY.RU, GIF, Calameo, ISSUU, Slideshare)** (Praha, Czech Republic)

46. Дуднік А. С. Систематизація вимірювальних приладів відповідно до методів вимірювання механічних величин та принципів їх виконання [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №7. С. 168 -172. **(РИНЦ, ScholarGoogle, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)** – Режим доступу: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2018/7/37.pdf>

47. Дуднік А.С. Аналіз методів вимірювання механічних величин та принципів їх виконання [Текст] / А.С. Дуднік // Сучасні тенденції розвитку науки: III міжнар. наук.-практ. конф., 27 – 28 липня 2018 р.: тези допов. – Львів., 2018. – С. 82 – 85.

48. Вимірювання координат і параметрів руху цілей [електронне видання] / режим доступу: <https://www.slideserve.com/shlomo/1-4311152>

49. Введення в радіолокацію. Загальні принципи радіолокації [електронне видання] / режим доступу: <http://polpoz.ru/umot/1-vvedennya-v-radiolokaciyu-zagaleni-principi-radiolokaciyi-za>

50. Класифікація вимірювальних приладів [електронне видання] / режим доступу: <https://studfiles.net/preview/3904780/>

51. Мікропроцесорний частотомір [електронне видання] / режим доступу: <https://mykonspekts.ru/1-40145.html>

## **РОЗДІЛ 4. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПОБУДОВИ І ТЕХНОЛОГІЇ ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН**

Несвоєчасне визначення позиції об'єкта, що входить до складу БСПС, призводить до генерування помилкової інформації, що стосується поточного розташування даного об'єкта, в комп'ютеризованій сенсорній системі вимірювання механічних величин [15, 16, 17].

Такий недолік, в свою чергу, має змогу призвести до, як у випадку з, несвоєчасного виявлення крадіжки цінних речей, джерела загоряння тощо. Особливо сприятливим середовищем, для такого роду негативних наслідків є завадова обстановка [15, 16, 17].

Таким чином, одними з найбільш проблемних місць БСПС є несвоєчасність передачі показників вимірювання, а також помилки при передачі. Це, в свою чергу, є причиною завадової обстановки, через велику кількість повторних спроб передати показники знову, що засмічує радіоефір та призводить до великої імовірності похибок при вимірюванні відстані механічних величин [15, 16, 17].

Серед різноманітних класів комп'ютеризованих вимірювальних систем особливе місце займають ті, транспортна служба яких побудована на використанні радіоефіру в якості середовища передачі даних комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин [15, 16, 17].

Тому при створенні наукових основ побудови комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин важливе місце займає продуктивність БСПС. Методів підвищення показників продуктивності БСПС, в літературі не міститься [15, 16, 17].

Тому задачею даного розділу є розробка моделей, методів і технологій побудови та застосування комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин, з метою контролю параметрів тих чи інших побутових, промислових



та спеціальних приладів, що використовують ті чи інші служби, а також методи покращення їх метрологічних характеристик та підвищення їхньої продуктивності [15, 16, 17].

За результатами досліджень, проведених у даному розділі, автором опубліковані роботи [1, 5, 12, 16-30, 36-37, 40-43].

## **4.2. Методи підвищення точності вимірювання відстані в безпроводних сенсорних приладових системах**

### **4.2.1 Шляхи підвищення точності методу вимірювання відстані на основі падіння потужності сигналу**

В даному дослідженні буде застосовуватись метод визначення відстані на основі втрати потужності сигналу за допомогою рівняння Фріса. У підрозділі 2.1.1 розглянуто не всі фактори, що можуть впливати на показник потужності сигналу, тому в цьому дослідженні запропоновані варіанти рівняння Фріса, що можуть підвищити точність обчислення потужності сигналу, враховуючи ті чи інші особливості радіоефіру [1].

Щоб розпочати виведення рівняння Фріса, розглянемо дві антени сусідніх пристроїв БСПС (рис. 4.1) в вільному просторі (без перешкод поблизу), що знаходяться на відстані  $R$  [1]

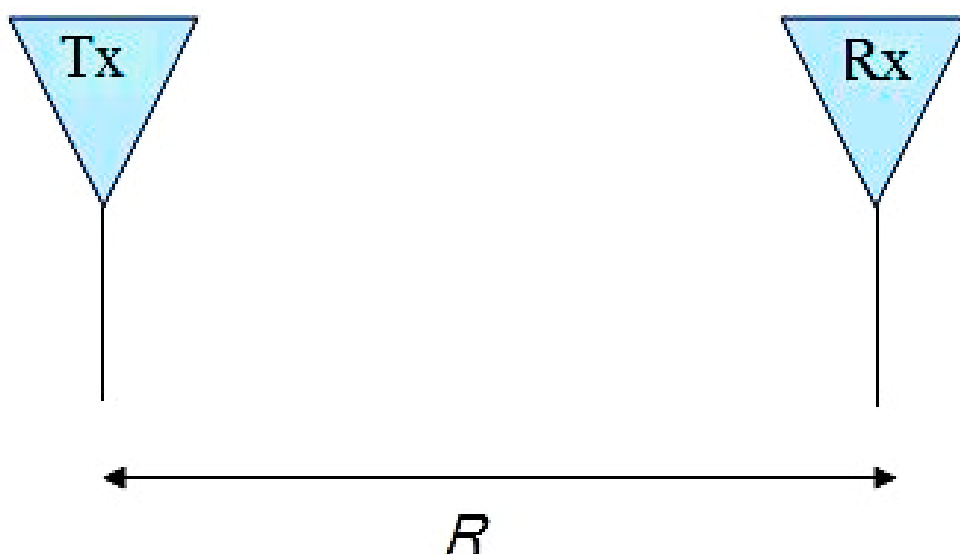


Рисунок 4.1. – Передача (Tx) і прийом (Rx) антен, розділених  $R$  [1]

Припустимо, що  $P_T$  – загальна потужність передавальної антени. Нехай передавальна антенний пристрій є всенаправленою, без втрат і що приймальна антенний пристрій знаходиться на далекій відстані від передавальної антени. Тоді щільність потужності  $p$  (у ватах на квадратний метр) плоскої хвилі, що падає на приймальну антенний пристрій, на відстані  $R$  від передавальної антени визначається [1]:

$$p = \frac{P_T}{4\pi R^2}.$$

Якщо передавальна антенний пристрій має коефіцієнт підсилення у напрямку приймаючої антени  $G_T$ , то рівняння визначення потужності можна переписати наступним чином [1]:

$$p = \frac{P_T}{4\pi R^2} G_T.$$

**Коефіцієнт підсилення і втрати реальної антени.** Припустимо тепер, що приймальна антенний пристрій має діючу діафрагму, задану  $A_{ER}$ . Тоді потужність, отримана цією антенною ( $P_R$ ), задається [1]:

$$p = \frac{P_T}{4\pi R^2} G_T A_{ER}.$$

Оскільки ефективну діафрагму для будь-якої антени можна також виразити як [1]:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G,$$

де  $A_e$  – площа діючої діафрагми;  $\lambda$  – кут нахилу діючої діафрагми;  $G$  – коефіцієнт підсилення антени [1].

Отриману потужність можна записати як [1, 2]:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2}. \quad (4.1)$$

де  $G_R$  - коефіцієнт підсилення у напрямку передавальної антени.

Це рівняння відоме як формула трансмісії Фріса. Це пов'язано з втратою сигналу, коефіцієнтом підсилення антени та довжиною хвилі до прийнятих і

переданих потужностей. Це одне з фундаментальних рівнянь в теорії антен, і його треба запам'ятати (так само як і виведене вище) [1].

Ще одна корисна форма рівняння Фріса передачі наведена в рівнянні (3.2). Оскільки довжина хвилі та значення частоти  $f$  залежать від швидкості світла  $c$ , отримана Формула трансляції Фріса з точки зору частоти [1, 3]:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R c^2}{(4\pi R f)^2}. \quad (4.2)$$

Рівняння (3.2) показує, що більша потужність втрачається при більш високих значення частот. Це фундаментальний результат трансляції рівнянь Friis. Це означає, що для антен з заданими приростами потужність передачі буде найвищою на нижчих значення частот. Різниця між отриманою потужністю та переданою потужністю відома як *втрата рівня сигналу*, що *обернено пропорційна до відстані між прийомопередавальний пристроями*. Іншими словами, рівняння Friis Transmission говорить про те, що втрата рівня сигналу на відстані, вища для більш високих частот [1].

Важливість цього результату від Формули трансмісії Фріса не має змогу бути завищена. Саме тому мобільні телефони зазвичай працюють на частоті менше 2 ГГц. Там має змогу існувати більший спектр частот, але мають зв'язок з цим втрати потужності на шляху не дозволяють отримати якість сигналу. Як ще один наслідок рівняння Фріса, потрібно мати на увазі, що мова йде про антени 60 ГГц. Відзначаючи, що ця значення частоти дуже висока, можна стверджувати, що втрата шляху буде занадто високою для спілкування на довгому діапазоні. На дуже високих значення частот (60 ГГц іноді називають зоною мм (міліметрової хвилі)) втрата контуру дуже висока, тому можливий лише зв'язок точка-точка. Це трапляється, коли приймаючий пристрій і передавальний пристрій знаходяться в одній кімнаті та у прямій видимості один до одного [1].

Виникає питання: чому оператори мобільного зв'язку задоволені новим діапазоном LTE (4G), який працює на частоті 700 МГц (в цьому ж діапазоні

працюють якірні вузлові пристрої БСПС, отримуючи з Інтернету дані про розташування)? Відповідь є така: це менша значення частоти, ніж антени, які традиційно працюють, але з рівняння (4.2) відзначаємо, що втрата сигналу буде також нижчою. Таким чином, вони можуть «покривати більше простору» з цим частотним спектром [1].

З іншого боку, виробники повинні мати антенний пристрій з більшою довжиною хвилі на компактному пристрої (нижча значення частоти = більша довжина хвилі), тому робота розробника антени для пристрою БСПС була дещо складнішою [1, 4].

Нарешті, якщо антени не співпадають з поляризацією, то отримана вище потужність має змогу бути помножена на коефіцієнт втрати поляризації ( $PLF$ ), щоб правильно визначити цю невідповідність. Вищевказане рівняння (4.2) можна змінити для отримання узагальненої формули трансмісії Фріса, що включає в себе невідповідність поляризації [1, 4]:

$$P_R = (PLF) \frac{P_T G_T G_R c^2}{(4\pi R f)^2}.$$

#### 4.2.2. Шляхи підвищення точності методу вимірювання відстані на основі часу прибуття сигналу

Загальний підхід до визначення місця розташування об'єкта заснований на вимірюванні характеристик радіосигналу, який випромінюється передавальний пристроєм, розташованим на об'єкті, і приймається стаціонарними приймаючий пристроями з відомими координатами [5]. За цими характеристиками оцінюється відстань між передавальний пристроєм і кожним з приймаючий пристрійів. Потім з урахуванням геометричних принципів визначаються координати об'єкта.

В якості характеристик сигналу можуть бути використані наступні величини:

- час поширення сигналу від передавальний пристрою до приймаючий пристрою;

- різниця показників часу поширення сигналів від передавальний пристрою до різних приймаючий пристрійів;

- інтенсивність сигналу;

- напрямок приходу сигналу.

### ***Опис моделі визначення відстані.***

Для визначення відстані між двома об'єктами має змогу бути використано також час поширення сигналу від першого об'єкта до другого плюс час поширення сигналу в зворотному напрямку.

Розглянемо задачу визначення відстані між передавальний пристроєм і приймаючий пристроєм за допомогою хаотичних радіоімпульсів.

Будемо вважати, що є 2 пристрої: зондуєчий (А) і зондуємий (Б). Обидва пристрої включають в себе приймаючий пристрій, передавальний пристрій і цифрову частину. Передавальний пристрій в А випромінює імпульс або серію імпульсів, а приймаючий пристрій в Б, відповідно, приймає імпульс або серію імпульсів.

Через фіксовану тимчасову затримку передавальний пристрій в Б випромінює одиночний імпульс або групу імпульсів, а приймаючий пристрій в А їх приймає. Інтервал часу  $\Delta t$  між моментом випромінювання імпульсу передавальний пристроєм в А і моментом його приходу в приймаючий пристрій в А, за вирахуванням затримки  $\tau$  в пристрої Б, поділений навпіл і помножений на швидкість світла  $c$ , визначає відстань  $l$  між передавальний пристроєм і приймаючий пристроєм:

$$l = \frac{\Delta t - \tau}{2} c. \quad (4.3)$$

Момент приходу імпульсу будемо оцінювати, застосовуючи приймаючий пристрій, який виділяє огинаючу імпульсу. Приймаючий пристрій являє собою послідовно з'єднані квадратичний детектор і фільтр нижніх частот. Після фільтра нижніх частот розташовується граничний пристрій, що фіксує момент часу, коли сигнал, відповідний імпульсу, починає перевищувати деяке порогове

значення (рис. 1). Цей момент часу приймаємо за момент приходу хаотичного радіоімпульсу.

**Оцінка похибки вимірювання часу, з метою визначення відстані між об'єктами, з врахуванням перешкод.**

Оцінимо похибку у визначенні моменту часу приходу переднього фронту імпульсу, викликану тепловим шумом, а також ефектом неоднорідності розподілу енергії в часі протягом усього імпульсу. Скористаємося прикладом з [6] (див. Рис.4.2).

В даному випадку, так як використовується огинаюча радіоімпульсу на виході приймаючий пристрою, то не має значення, який несучий сигнал мав радіоімпульс, а важлива тільки рівномірність розподілу енергії в часі, відповідно тривалості всього імпульсу [7]. На малюнку суцільною лінією зображена огинаюча незашумленого імпульсу, пунктирною - імпульсу з шумом. Горизонтальною пунктирною лінією вказано поріг компаратора.

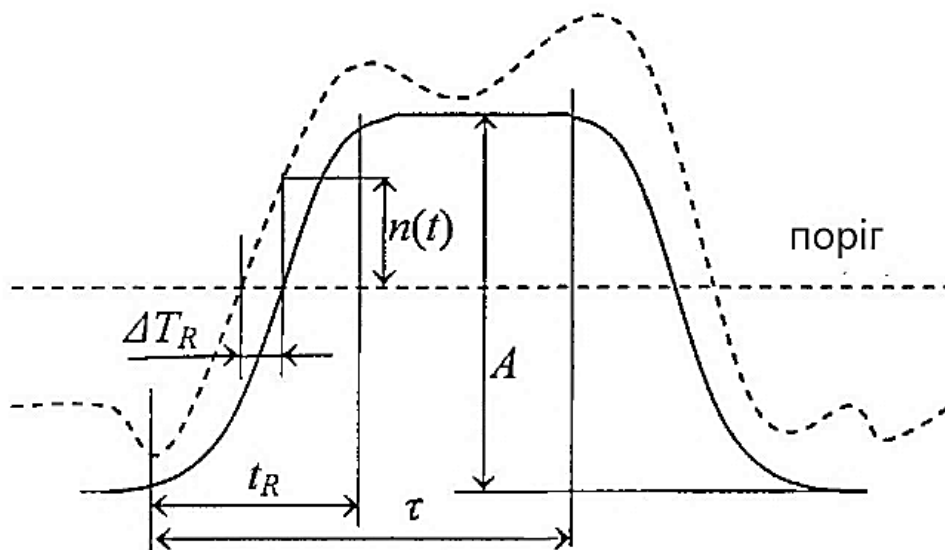


Рисунок 4.2. – Визначення часу приходу імпульсу по передньому фронту

Нехай  $n(t)$  – зміщення імпульсу через шум за амплітудою,  $A$  – амплітуда прийнятого незашумленого імпульсу,  $\Delta T_R$  – похибка вимірювання часу приходу імпульсу,  $t_R$  – тривалість переднього фронту імпульсу,  $\tau$  – тривалість імпульсу при передачі. Тоді швидкість росту переднього фронту імпульсів [8] в незашумленому  $S_1$  і зашумленому  $S_2$  випадках буде відповідно [9]:

$$S_1 = \frac{A}{t_R} \quad (4.4)$$

$$S_2 = \frac{n(t)}{\Delta T_R} \quad (4.5)$$

При великих амплітудах імпульсів ці швидкості росту повинні бути рівні. Тобто  $S_1 = S_2$ . Тоді з (4.4) і (4.5)

$$\Delta T_R = \frac{n(t)}{A/t_R}, \text{ або}$$

$$\sqrt{(\Delta T_R)^2} = \delta T_R = \frac{t_R}{\sqrt{\frac{A^2}{n^2}}} = \frac{t_R}{\sqrt{\frac{2P}{N}}} \quad (4.6)$$

де  $\frac{A^2}{n^2}$  відношення сигнал/шум для продетектованого імпульсу. Тут  $P$  – потужність сигналу,  $N$  – потужність шуму в смузі фільтру низьких частот (ФНЧ). Якщо  $B$  – смуга ФНЧ то

$$t_R = \frac{1}{B}$$

Нехай

$$S = \frac{E}{\tau},$$

$N=N_0B$ , де  $E$  – енергія імпульсу, що приймається,  $N_0$  – спектральна густина потужності шуму. Тоді

$$\delta T_R = \frac{\tau}{\sqrt{2B \frac{E}{N_0}}}$$

Таким чином, якщо, як у випадку 3, полоса  $B=5 \times 10^7$  Гц,  $\tau = 10^{-7}$  с,  $\frac{E}{N_0} = 20 \text{ дБ} = 100$ , [10,11] то  $\delta T_R \approx 3$  нс. Вплив ефекту неоднорідності розподілу енергії в хаотичному імпульсі за часом схожий з впливом білого гаусового шуму. Тому, оцінивши співвідношення «сигнал/шум» викликане цим ефектом можна порівняти його з співвідношенням сигнал/шум викликаним білим шумом і підставляти в розрахунки менше з цих двох відношень.

### 4.3. Технології побудови комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин

#### 4.3.1. Технологія розгортання БСПС та класифікації її пристроїв

В основі технології *ZigBee/802.15.4*, на основі якої побудовані пристрої БСПС, існує три класи пристроїв: *FFD*-пристрої маршрутизації (*Full Function Device* – пристрій з повним комплектом функцій – *R*), пристрої-координатори (якірні вузлові пристрої) (*Coordinators* — *FFD* з додатковими ресурсами системи залежно від складності БСПС – *C*) і *RFD*-кінцеві пристрої (*Reduced Function Device* – пристрій з обмеженим набором функцій – *E*) рис. 4.3 [12, 36].

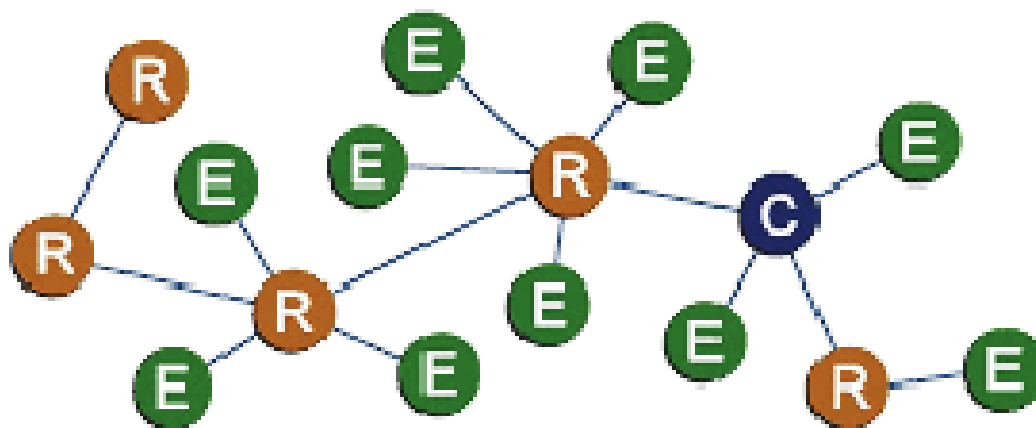


Рисунок 4.3. – Варіант моделі розгортання БСПС [12, 36]

У кожному сегменті БСПС на основі пристроїв стандарту *ZigBee* присутній тільки один координатор (якірний вузловий пристрій). Його основне завдання полягає у встановленні параметрів і автоматичному об'єднанні сусідніх пристроїв у сегмент БСПС, виборі основного радіочастотного каналу, в заданні унікального ідентифікатора [36].

Тому координатор є найскладнішим з цих трьох типів пристроїв, має великий обсяг пам'яті і підвищене енергоспоживання (як правило, застосовується живлення від БСПС змінного струму) [36].

Пристрої маршрутизації використовуються для розширення радіуса дії БСПС, тому що здатні виконувати функції ретрансляторів між пристроями, розміщеними далеко один від одного [36].



Пристрої маршрутизації підтримують будь-яку топологію приладів стандарту *ZigBee*, можуть виконувати функції координатора і звертатися до усіх вузлових пристроїв БСПС (FFD, RFD) [36].

Пристрої з обмеженим набором функцій не беруть участі у маршрутизації, не можуть виконувати функцію координатора, звертаються тільки до координатора сегменту (FFD-пристрою), підтримують топології типу «кожен з кожним», «зірка», відіграють роль кінцевих вузлових пристроїв БСПС [13, 36].

На практиці більшість вузлових пристроїв БСПС – RFD-пристрої, а використання FFD-пристроїв і координаторів потрібне для утворення мостів зв'язку і відповідної структурної ієрархії БСПС [36].

Як тільки маршрутні та інші пристрої під'єднуються до БСПС, вони отримують інформацію про неї від координатора або будь-якого іншого існуючого маршрутного пристрою, вже залученого в БСПС, і на основі цієї інформації встановлюють свої операційні параметри відповідно до характеристик БСПС. Маршрутний пристрій *ZigBee* отримує таблицю адрес пристроїв БСПС, які він поширює між сполученими з ним кінцевими пристроями [36].

Пристрій FFD використовує деревоподібну скорочену адресацію під час ухвалення рішення про маршрут. Кожен маршрутний пристрій, на якому дозволено використовувати скорочення, повинен підтримувати таблицю, що містить пари виду DN, де D – адреса призначення і N – адреса наступного пристрою на шляху до призначення [14, 36].

Комбінація маршрутизації на деревоподібному принципі забезпечує гнучкість роботи і надає розробникам вибір оптимального відношення ціна/продуктивність [36].

#### 4.3.2. Метод підвищення продуктивності маршрутних пристроїв

Об'єктом даного дослідження є пристрій маршрутизації (*R*) БСПС. Проблемним місцем якого є сенсорний модуль, що залежить від обмеження

енергетичного запасу елемента живлення, що в свою чергу впливає на завадостійкість його передачі даних, через обмеження потужності його сигналу. На рис. 4.4. зображена спрощена модель транспортної системи передачі даних БСПС між 2 окремо взятими пристроями [16, 36].

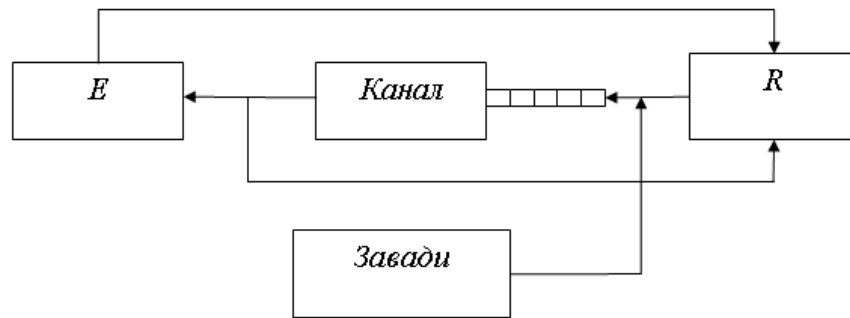


Рисунок 4. 4. – Концептуальна модель фрагменту транспортної системи БСПС:  
Е – кінцевий одноканальний пристрій; R – маршрутний багатоканальний пристрій [16]

Розглянувши специфіку транспортування даних у БСПС стандарту *ZigBee* (*IEEE 802.15.4*), розглянемо також роботу маршрутного пристрою, побудованого із використанням рекомендацій стосовно даної технології, структура якого зображена на рис. 4.5 [15, 16, 17].

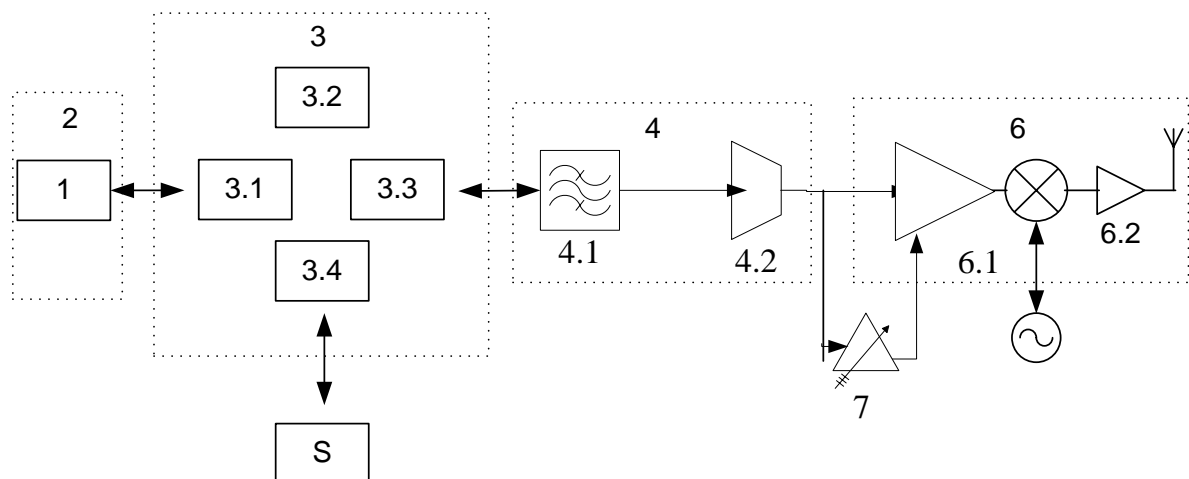


Рисунок 4.5. – Структурна схема маршрутного пристрою [15, 16, 17]

Пристрій має наступну будову: 1 – інтерфейс мережевого рівня 2, 3 – модуль підрівня LLC канального рівня моделі OSI, 3.1 – блок хост-інтерфейсу,

3.2 – вбудований мікроконтролер, 3.3 – блок додатку прийомо/передавальний пристрою, 3.4 – блок шинного інтерфейсу, S – пам'ять, 4 – модуль підрівня MAC канального рівня, 4.1 – контролер смуги частот, 4.2 – радіочастотний прийомо/передавальний пристрій, 6 – модуль фізичного рівня, 6.1 – інтерфейс фізичного рівня, 6.2 – антенний пристрій, 7 – блок автоматичного налаштування частоти [16, 36].

Технологія роботи даного пристрою така. Керуючий блок 1 надсилає команду про відправку пакета та сам пакет на модуль підрівня *LLC* канального рівня 3. В модулі підрівня *LLC* канального рівня *OSI* через блок хост-інтерфейсу 3.1, пройшовши відповідні перетворення за допомогою додатків даного модуля, пакет стає фреймом. Після чого вбудований мікроконтролер 3.2 передає фрейм до блоку додатку прийомо/передавальний пристрою 3.3 та через блок шинного інтерфейсу 3.4 записує дані про стан передавання до пам'яті S, де вони ще певний час зберігаються [16, 36].

Блок додатку прийомо/передавальний пристрою 3.3 спрямовує фрейм до модуля підрівня *MAC* канального рівня 4. В модулі підрівня *MAC* канального рівня ЕМ *OSI/ISO* модулі контролер смуги частот 4.1 підбирає для даного фрейму оптимальний діапазон частот та спрямовує фрейм до радіочастотного прийомо/передавальний пристрою 4.2 [16, 36].

В даному модулі відбувається як перетворення фрейму у електромагнітні коливання, так й їх модуляція відповідно до вмісту фрейму.

Після цього коливання передаються до модулю фізичного рівня *OSI* 6, а інформація про підібраний блоком 4.1 діапазон частот передається до блоку автоматичного налаштування частоти 7. Блок 6.1 модулю фізичного рівня *OSI* накладає електромагнітні коливання на частоту, яка налаштовується блоком 7. Коливання спрямовуються до антени 6.2, яка передає сигнал до радіоефіру [16, 36].

В даному пропонується метод підвищення продуктивності, що полягає у вдосконаленні алгоритму обслуговування заявок у каналі передачі даних вимірювання БСПС, що зображений на рис. 3.4. А також у модернізації

структурної схеми маршрутного пристрою пристрою передачі даних, що зображений на рис. 3.5 [16, 36].

В якості основного показника технічних характеристик продуктивності БСПС використано час затримки бітів в каналах передавання ( $W_{\text{черги}}$ ). Цей час є одним із показників швидкості роботи БСПС, яка в свою чергу теж впливає на точність процесу локалізації та вимірювання відстані між об'єктами. Це є вкрай важливим у тих випадках, коли відстань визначається на основі загального часу прибуття сигналу між сусідніми пристроями. Даний показник є його безпосередньою складовою [16, 36].

Спочатку буде запропоновано математичну модель затримки бітів у багатоканальному маршрутному пристрої (що має зв'язок з більше ніж 2 сусідніми пристроями) [16, 36].

Даний процес буде розглянуто з певною неточністю, так як його представлено, як стаціонарний, без врахування перехідних процесів (як у випадку з, встановлення зв'язку). [16]

Транзакт, що є неподільним об'єктом в системі імітаційного моделювання загального призначення, прирівнюється до біта, що переміщується від джерела інформації до споживача. Кожна фаза моделювалася СМО  $G/M/n$  з відмовами і дисципліною *FIFO*. Універсальна система імітаційного моделювання GPSS забезпечує збір і статистичну обробку даних про транзакти, затримані в кожній точці моделі, а також інтенсивності потоків відмов. Час затримки бітів в каналах передавання ( $W_{\text{черги}}$ ) даної БСП визначається у відповідності до формули для обчислення часу затримки в черзі багатоканального пристрою з очікуванням [16]:

$$W_{\text{черги}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} L_{\text{черги}}, \quad (4.7.)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність надходження бітів, що передаються для  $i$ -го стану;  $L_{\text{черги}}$  – середня кількість бітів, що передаються і визначається за наступною формулою [16]:

$$L_{\text{черги}} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i^{n+1} P_0}{n \cdot n! \left(1 - \sum_{i=1}^N \rho_i / n\right)^2},$$

де  $n$  – кількість розподілених підканалів радіоефіру, що для даного випадку складає 23 підканали;  $P_0$  – імовірність того, що підканал на даний момент зайнятий, визначається за формулою [16]:

$$P_0 = \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i}{1!} + \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i^2}{2!} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i^n}{n!} + \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i^{n+1}}{n! \left( n - \sum_{i=1}^N \rho_i \right)} \right)^{-1},$$

де  $\rho$  – навантаження на дану БСПС, що визначається за формулою [16]:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu},$$

де  $\lambda$  – інтенсивність надходження бітів до БСПС передавання даних при  $i$ -тому стані;  $\mu$  – інтенсивність обслуговування бітів у БСПС передавання даних. Підставивши усі ці значення у формулу (4.7), отримаємо наступну результуючу формулу [16, 18]:

$$W_{\text{черги}} = \frac{1}{\lambda} \frac{\left( \left( \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \right)^{n+1} \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\frac{\mu}{1!}} + \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\frac{\mu}{2!}} + \dots + \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\frac{\mu}{n!}} \right)^n + \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\frac{\mu}{n! \left( n - \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \right)}} \right)^{n+1} \right)^{-1}}{n \cdot n! \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\frac{\mu}{n}} \right)^2}.$$

Головний пристрій «*R*» передає біти в непарні моменти часу, а підлеглий пристрій «*E*» – у парні. Дана модель має ієрархічну будову адже пристрій, який для окремої ділянки БСПС є головним, для іншої ділянки має змогу бути підлеглим. Експериментальне дослідження даної моделі було проведене за допомогою інструментального засобу *GPSS*, при  $10^6$  прогонів.

З отриманих результатів виявлено, що співвідношення часу затримки відповідає реально наявним співвідношенням параметрів БСПС [16, 18].

Запропоновано алгоритм функціонального об'єднання нижніх рівнів еталонної моделі *OSI* (рис. 4.8) [16].

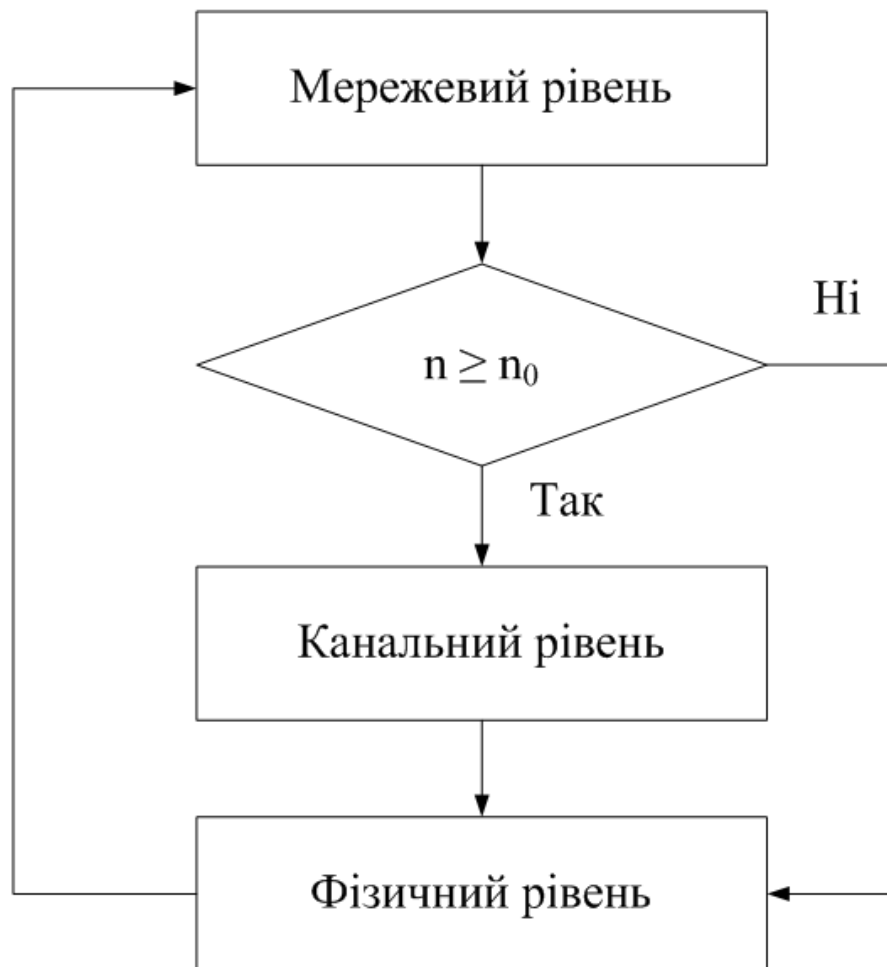


Рисунок 4.8. – Блок-схема алгоритму аналізу рівня потужності сигналу [16]

Дану технологію в роботах [20] було застосовано для досліджень БСПС стандарту IEEE 802.11, а в даній роботі пропонується його застосувати до БСПС стандарту ZigBee (IEEE 802.15.4) із застосуванням алгоритмів «FIFO»,

«Пріоритетне обслуговування», «Зважені черги». Це дало змогу одержати за формулою (5) результати, що зображені на рис. 4.9, 4.10 [16, 21].

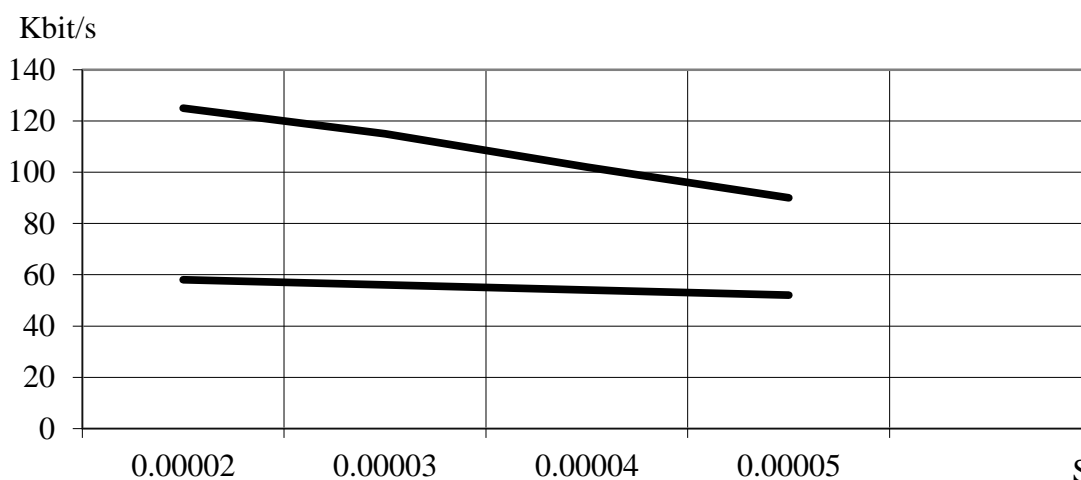


Рисунок 4.9. – Графік залежності пропускної спроможності каналу передавання від часу затримки на обробку [16]

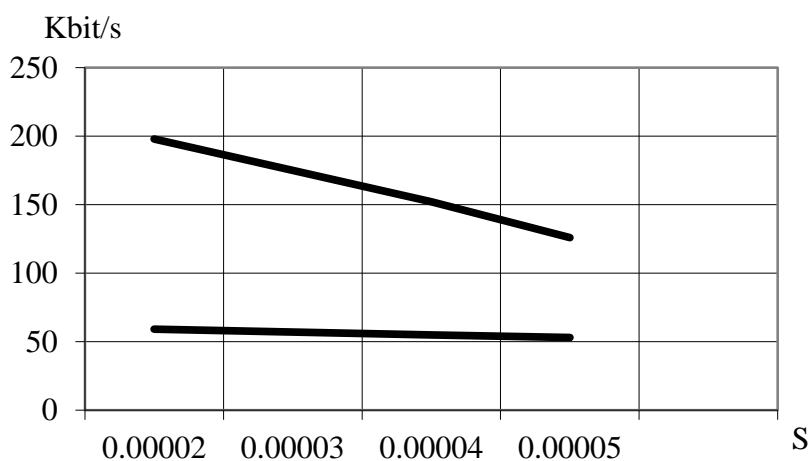


Рисунок 4.10. – Графік залежності пропускної спроможності каналу передавання від часу затримки на обробку при розширенні смуги частот [16]

Алгоритм базується на контролюванні бітів фрейму фізичного рівня. Він побудований з тою метою, щоб з полів фрейму, які містять інформацію про середовище передавання даних, отримувати потрібну інформацію. У даному методі мережевий рівень через певні проміжки часу відсилає запити на

фізичний про стан потужності сигналу на даний момент, що визначається за формулою Фрісса. Інформація про стан сигналу міститься у полі, в якому перші біти тримають у собі інформацію про швидкість передавання, а інші про стан сигналу [16, 20].

Алгоритми управління чергами потрібні для роботи в періоди тимчасових перевантажень при максимальному завантаженні каналів передавання БСПС. Вона знаходиться у складі комп'ютеризованої системи вимірювання механічних величин. Це потрібно тоді, коли пристрій БСПС не має змогу впоратися з передаванням бітів на вихідний інтерфейс в тому темпі, в якому вони поступають [16, 19, 20, 36].

Якщо причиною перевантаження є недостатня продуктивність процесорного блоку пристрою БСПС, то необроблені біти тимчасово накопичуються у вхідній черзі відповідного вхідного інтерфейсу. Черг до вхідного інтерфейсу має змогу бути декілька, якщо диференціюються запити на обслуговування по декількох класах. У тому ж випадку, коли причина перевантаження полягає в обмеженій пропускній спроможності вихідного інтерфейсу, біти тимчасово зберігаються у вихідній черзі (або чергах) цього інтерфейсу [16, 19, 20, 36].

Концептуальні моделі БСПС з застосуванням різних алгоритмів управління чергами в БСПС представлені відкритою багатофазною системою масового обслуговування. Кожна фаза моделювалася СМО  $G/M/n$  побудована згідно умов того чи іншого алгоритму управління чергами. Результуючою формулою для визначення часу затримки бітів в каналах передавання ( $W_{\text{черги}}$ ) даної БСПС буде формула (1), тому що модель даної БСПС також представлена у вигляді багатоканальної СМО з очікуванням. Опишемо роботу даної системи: біти, що надходять сенсорному пристрою БСПС, який передає дані вимірювання, стають у чергу на обслуговування. Далі вони стають в чергу на розподілення до пристроїв, які є їхніми адресатами. Потім вони стають у чергу на обробку до потрібного адресату [16, 19–21, 36].



Зазвичай кожному з станів потужності сигналу відповідає число від 0 до 6. На основі одержаних даних мережевий рівень формує уявлення про зміну станів зв'язку, постійно порівнюючи теперішній та попередній стани ( $n < n_0$  чи  $n \geq n_0$ ). У випадку, коли зміна станів відповідає  $n < n_0$ , мережевий рівень відсилає повторний запит. Даний цикл буде відбуватися до тих пір, доки ситуація не стане протилежною ( $n \geq n_0$ ) (гілка «так»). Лише тоді мережевий рівень направить до каналного показники вимірювань та наказ на їх передавання. Потім каналний рівень, при наявності вільного каналу, надасть наказ на генерацію бітів фізичному рівню, у відповідності до конкретних показників [16, 19, 20, 36].

Особливості даного алгоритму було враховано в структурній схемі маршрутного пристрою БСПС, що виконувала б функцію зв'язку між додатками фізичного та мережевого рівнів еталонної моделі *OSI*. Тобто працювала б на основі даного алгоритму. Саме з цієї причини в існуючу структурну схему пристрою БСПС, що зображений на рис. 3, вводиться аналізатор потужності сигналу, роль якого має змогу виконувати мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-кутових величин на основі потужності сигналу 5 (рис. 4.11) [16, 19, 22, 36].

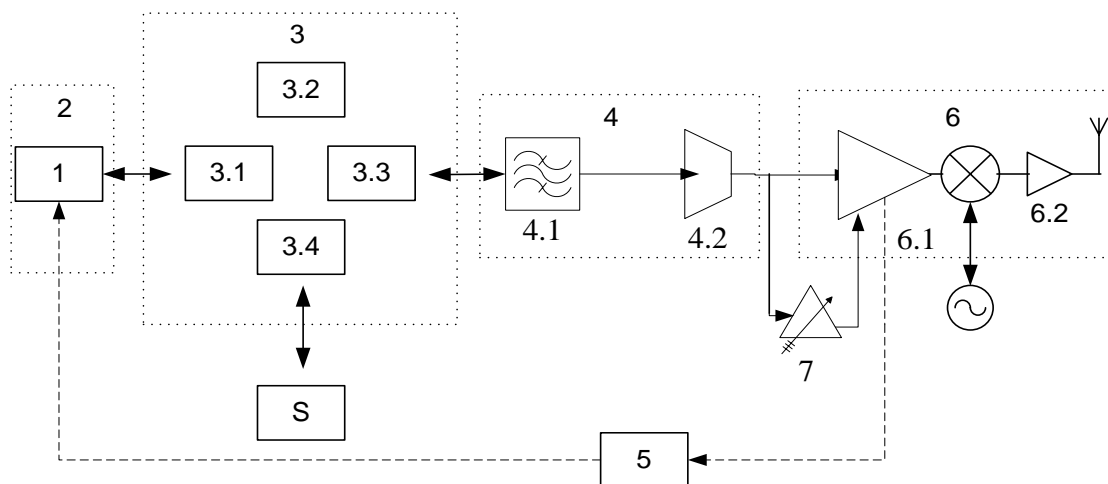


Рисунок 4.11. – Маршрутний пристрій БСПС з системою підвищення якості передачі показників вимірювання в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю [16, 19, 22, 36]

Даний пристрій складається: 1 – керуючий блок 1, що є частиною *NMS*, модулю мережевого рівня 2, 3 – модуль підрівня *LLC* канального рівня моделі *OSI*, 3.1 – блок хост-інтерфейсу, 3.2 – вбудований мікроконтролер, 3.3 – блок додатку прийомо/передавальний пристрою, 3.4 – блок шинного інтерфейсу, *S* – пам'ять, 4 – модуль підрівня *MAC* канального рівня, 4.1 – контролер смуги частот, 4.2 – радіочастотний прийомо/передавальний пристрій, 5 – аналізатора потужності сигналу (роль якого виконує мікропроцесорний первинний перетворювач на основі потужності сигналу), 6 – модуль фізичного рівня, 6.1 – інтерфейс фізичного рівня, 6.2 – антенний пристрій, 7 – блок автоматичного налаштування частоти [16, 19, 36].

При побудові пристрою, блоки розбито на модулі, згідно їхньої належності до того чи іншого рівня еталонної моделі [19, 36].

Структура системи розподілу пропускної спроможності по підканалам наведена на рис.4.12 [16, 36].

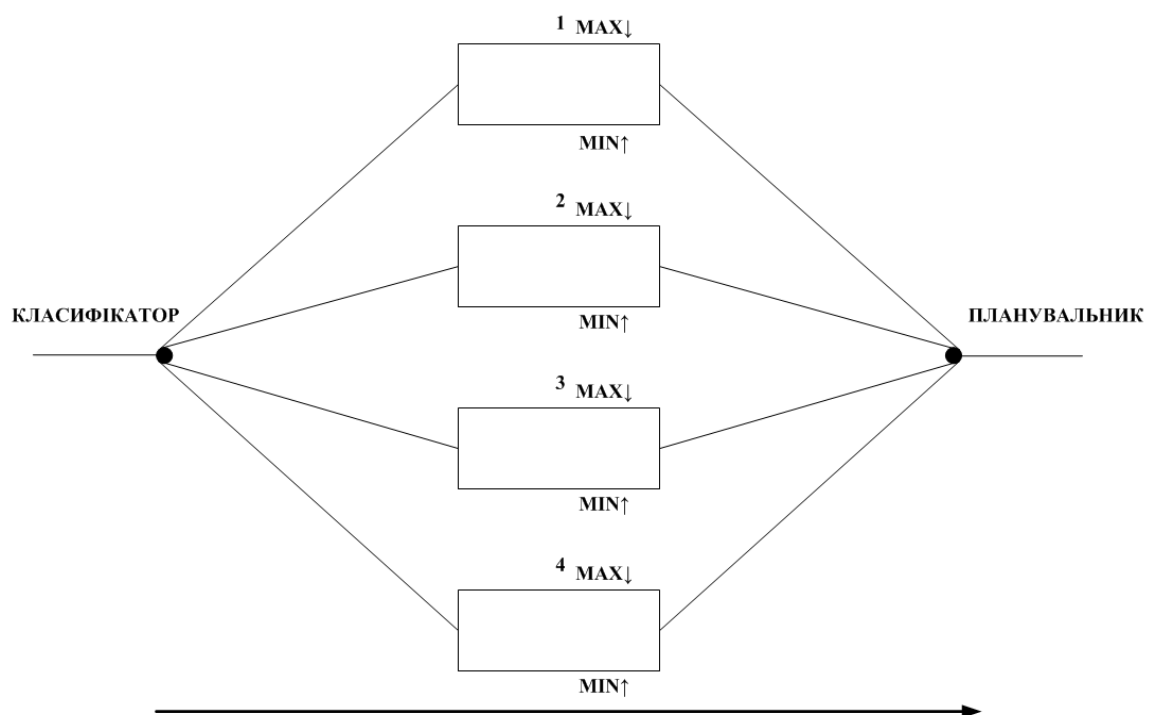


Рис. 4.12. Модель каналу передавання БСПС з використанням адаптованого методу перерозподілу пропускної спроможності [16, 19, 20, 36]

Перерозподіл буде відбуватися наступним чином:

1. Пристроюм або групі пристроїв з найнижчим пріоритетом присвоюється число 1, кожному наступному пріоритету присвоюється число на 1 більше [16, 36].

2. Таким же чином пріоритети будуть присвоюватись і класам у відповідності до вимірювальних параметрів.

3. Далі обчислюється пропускна спроможність підканалу, який буде надано для відправки показників вимірювання, за формулою 4.8 [16, 36]:

$$C(\%) = \frac{P_K + P_T}{2} \times 10 \quad (4.8)$$

де  $C$  – пропускна спроможність у відсотках,  $P_K$  – пріоритет пристрою,  $P_T$  – пріоритет класу показників вимірювання (дана формула справедлива лише в тих випадках, коли сума пріоритету користувача та трафіку не перевищує 10).

Головною умовою є те, щоб пристрою з найвищим пріоритетом ніколи не нараховувались усі 100% пропускної спроможності, а з найнижчим ніколи не було 0% [16, 19, 36].

Структурна каналу маршрутного приладу з динамічним перерозподілом потоків, що реалізує дану модель зображена на рис. 4.13 [16, 19, 36].

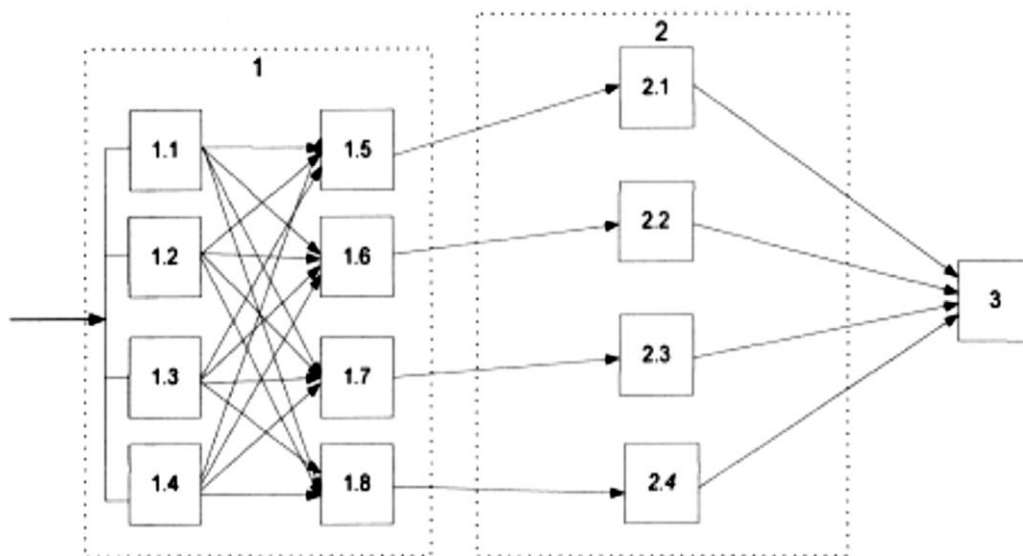


Рисунок 4.13. – Структурна схема каналу маршрутного пристрою з динамічним перерозподілом потоків в каналах БСПС [16, 19, 20, 36]

Задачею моделі є поліпшення умов проходження заявок через обслуговуючі пристрої маршрутних построїв БСПС шляхом адаптованого перерозподілу потоків вимірювальному каналі [16, 19, 36].

Поставлена задача вирішується тим, що в маршрутизатор БСПС з динамічним перерозподілом потоку заявок, який містить класифікуючий блок, що розподіляє потоки згідно з пріоритетом, здійснюючи проходження заявок по декількох чергах, згідно з винаходом [23], введено подвійний класифікатор, який здійснює розподіл заявок за двома класами [16, 19, 36].

Введення в пристрій подвійного класифікатора вигідно відрізняє запропонований маршрутний пристрій БСПС від прототипів, оскільки в прототипах відбувається лише знаходження оптимального маршруту та передавання показників вимірювання по ньому [16, 19, 36].

В запропонованому ж пристрої здійснюється оптимальне переналаштування параметрів самого маршрутного пристрою БСПС без переходу на інший [16, 19, 36].

На рис. 4.11 зображена структурна схема безпроводового маршрутного пристрою з динамічним перерозподілом потоку заявок [16, 19, 36].

Маршрутний пристрій БСПС з динамічним перерозподілом потоку заявок містить двоступеневий класифікуючий блок 1, який містить класифікатор згідно з пріоритетом класу пристрою (*E, R, C та один резервний пріоритет*) 1.1-1.4 та класифікатор згідно з пріоритетом за видом параметрів вимірювання (показники GPS, дані з інтернету, показники лазерного далекоміра та показники на основі вимірювань втрати потужності сигналу або часу його прибуття) 1.5-1.8, черги обслуговуючого пристрою 2.1-2.4 та обслуговуючий пристрій (планувальник) 3 [16, 19, 36].

Двоступеневий класифікуючий блок 1, який містить класифікатор згідно з пріоритетом пристрою 1.1-1.4 та класифікатор згідно з пріоритетом параметрів вимірювання 1.5-1.8, здійснює розподіл потоку заявок згідно з умовою формули 3.5 [16, 19, 36].

#### 4.3.3. Метод підвищення продуктивності та точності вимірювань пристроїв-координаторів

Об'єктом даного дослідження є комп'ютеризований лазерний далекомір з сенсорним мережевим інтерфейсом, що буде застосовуватись у якості пристрою координатора (С), що є якірним вузлом сегменту БСПС. На рис. 4.14 зображена структурна схема даного далекоміра, що поєднує в собі класичний лазерний далекомір та інтерфейс БСПС, що дозволяє використовувати функцію визначення відстані між об'єктами сенсорних приладів [45].

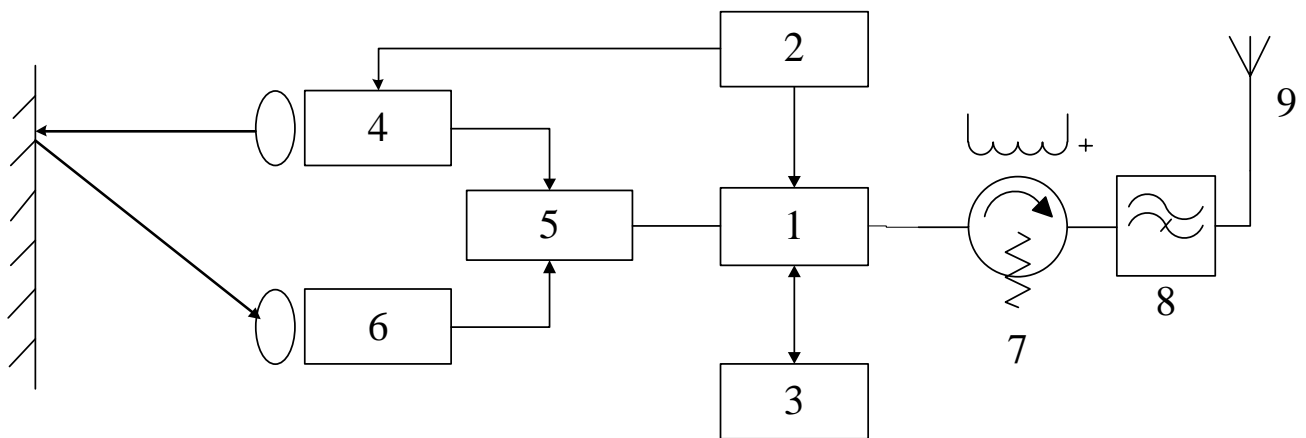


Рисунок 4.14. – Комп'ютеризований лазерний далекомір з сенсорним мережевим інтерфейсом: 1 – керуючий комп'ютеризований блок (що містить модуль GPS, LTE (4G) модем та модуль пам'яті); 2 – елемент живлення; 3 – сенсорний блок; 4 – напівпровідниковий лазерний випромінювач; 5 – блок вимірювання часових інтервалів; 6 – фотодіод-приймаючий пристрій; 7 – високочастотний фазовий модулюючий пристрій; 8 – фільтр Гауса; 9 – антенний пристрій [24, 45]

Технологія роботи даного пристрою така: керуючий блок 1 здійснює керування живленням, визначає відстань до потрібного об'єкта на основі співставлення часу направлення променя та часу його відбиття. Також він співставляє дані, що отримані GPS-модулем та з інтернету, де він отримує свої координати відносно карти місцевості. Таким чином він визначає свою позицію відносно 4 альтернативних джерел [45].

А також надсилає команду про відправку пакета та сам пакет, що містить результати вимірювань, передані сенсорним блоком 3 та фотодіодом-приймаючий пристроєм 6. Високочастотний фазовий модулюючий пристрій 7 перетворює пакет на впорядкований потік електромагнітних сигналів, кодованих по фазі, та надсилає до фільтру Гауса 8 (цей процес буде більш детально розглянуто у наступному підрозділі), де сигнали накладаються на несучу частоту та через антенний пристрій 9 відправляється в радіоефір. Елемент живлення 2 через керуючий блок 1 здійснює живлення постійним електричним струмом комп'ютеризований лазерний далекомір з сенсорним мережевим інтерфейсом. Це забезпечує його автономність та функціональність на протязі тривалого періоду часу [45].

Так, як даний пристрій з'єднаний з більш ніж одним сусіднім, то він теж є маршрутним і обслуговування заявок, що містять показники вимірювань інших пристроїв, він здійснює тими ж методами, щ і маршрутний [45].

В даному дослідженні пропонується метод підвищення точності комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин, що полягає у одночасному використанні даних вимірювання лазерного далекоміра та показників, що отримані завдяки функції локалізації об'єктів БСПС [45].

Ці дві функції поєднані у приладі, що зображений на рис. 1. Тут блоки 2, 4–6 відносяться до функціоналу лазерного далекоміра, а 1, 3, 7–9 – до функціоналу комп'ютеризованого сенсорного пристрою БСПС, що містить функцію вимірювання відстані [45].

*Мета дослідження* – розробка нових та удосконалення існуючих технологічних рішень для зменшення похибки вимірювання приладів, що входять до складу комп'ютеризованих систем вимірювання відстані [45].

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Реалізувати математичну модель вимірювання відстані за допомогою падіння потужності сигналу (підрозділи 2.1.1, та 3.1.1) [45].

2. Запропонувати метод вимірювання відстані за допомогою лазерного вдалекоміра, що включає нівелювання [45].

Далі розглянемо математичну модель роботи блоків лазерного далекоміра (рис. 4.14) [45].

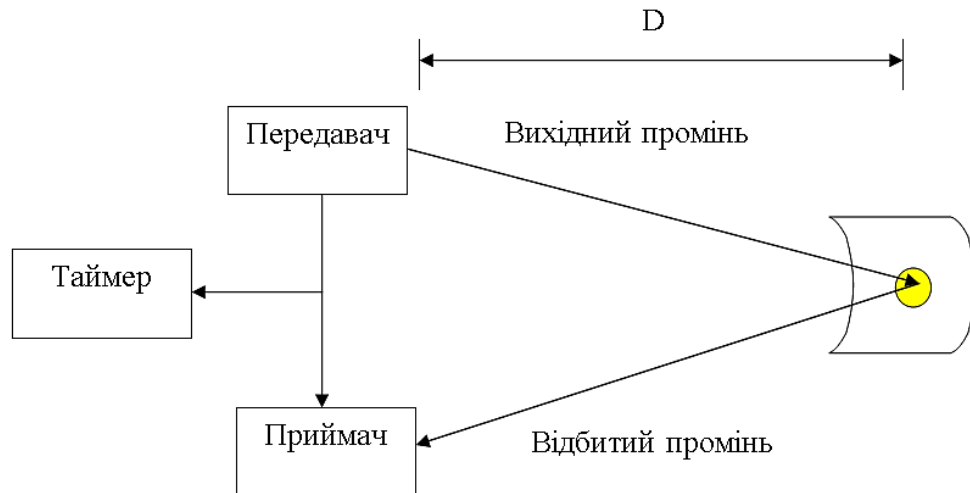


Рисунок 4.15. – Принцип роботи лазерного далекоміра

Властивість випромінення розповсюджуватись з постійною швидкістю дає можливість визначати дальність до об'єкта. Так, при імпульсному методі вимірювання використовується наступне співвідношення [45]:

$$D = \frac{ct}{2n},$$

де  $D$  – відстань до об'єкта;  $c$  – швидкість світла у вакуумі;  $n$  – показник заломлення середовища, в якому розповсюджується випромінення;  $t$  – час проходження імпульсу до цілі і назад (табл. 4.1) [45].

**Таблиця 3.1**

Час проходження імпульсу до цілі і назад

Відстань до цілі	1 м	10 м	100 м	1 км	10 км	100 км
Час відгуку	6,7 нс	67 нс	0,67 мкс	6,7 мкс	67 мкс	0,67 мс

Розгляд цього співвідношення показує, що потенціальна точність вимірювання дальності визначається точністю визначення часу проходження імпульсу енергії до об'єкта і назад. Чим коротший імпульс, тем краще [45].

У якості методу вимірювання пропонується тригонометричне нівелювання. Тригонометричне нівелювання – це метод визначення перевищення за виміряним кутом нахилу і відстанню між точками. Його застосовують при топографічних зніманнях і при визначенні великих перевищень. На рис. 4.15 наведено спрощену схему тригонометричного нівелювання. Над точкою  $A$  встановлюють теодоліт і вимірюють висоту приладу  $i$ , а в точці  $B$  встановлюють рейку. Для визначення перевищення  $h$  вимірюють кут нахилу  $v$ , горизонтальне прокладання  $d$  і фіксують висоту візування  $a$  (відлік, на який наведено візирний випромінювання),  $\Delta K_{AB}$  – поправка на кривизну Землі і рефракцію [15, 45].

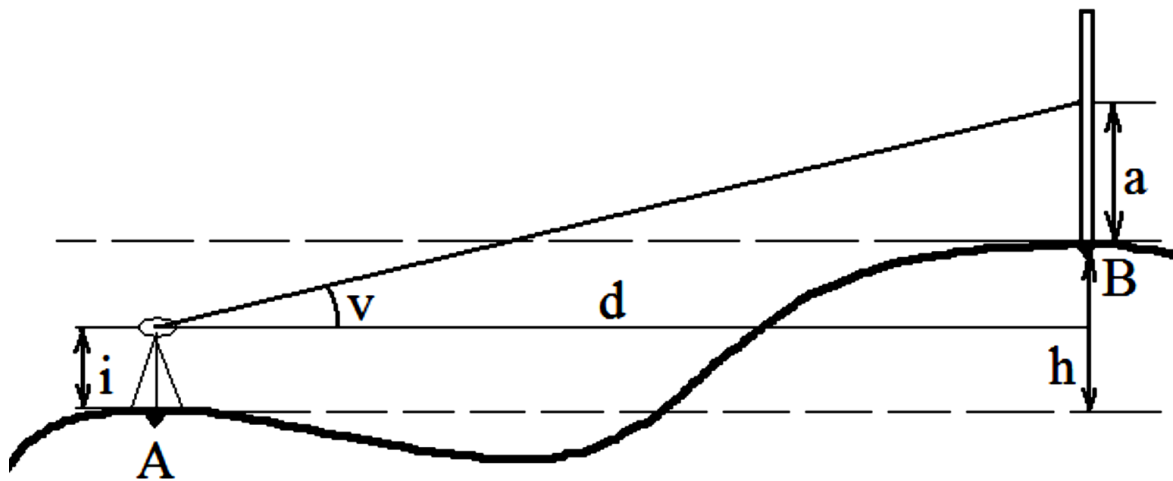


Рисунок 4.15. Спрощена схема тригонометричного нівелювання

Загальна формула тригонометричного нівелювання:

$$h = d \operatorname{tg} v + i - a + \Delta K_{AB}.$$

Дана формула актуальна лише для одностороннього нівелювання, що застосовується в даній роботі [25].

Якщо виходити з того, що електронний тахеометр містить електронний теодоліт (кутомір), електронний далекомір, GPS-приймаючий пристрій, а також обчислювальний пристрій з пам'яттю, для вимірювання похилих відстаней до заданих точок, горизонтальних і вертикальних кутів, та перетворення результатів із сферичної до декартової системи координат, то можна сказати,



що даний пристрій поєднує в собі усі ці функції. Разом з тим, функціонуючи у складі КССВМВ, він вигідно відрізняється від стандартного тахеометра тим, що не тільки має змогу вимірювати відстань до об'єкта зі своєї позиції, але і отримувати інформацію про позицію сенсорного приладу, який знаходиться у тій точці, відстань до якої вимірюється. Таким чином він аналізує відстань до об'єкта, маючи 2 альтернативних значення [26, 27].

До БЧПС з таким методом передачі даних можна приєднати датчики руху, що визначають проникнення людини через лінію розмежування. ІЧ-пасивні датчики, звані також оптико-електронними, відносяться до класу детекторів руху і реагують на теплове випромінювання руху людини [26, 27].

Принцип дії цих датчиків заснований на реєстрації зміни в часі різниці між інтенсивністю ІЧ випромінювання від людини і фонового теплового випромінювання. В даний час ІЧ-пасивні датчики є найпопулярнішими, вони становлять невід'ємний елемент охоронної системи практично кожного об'єкта [26, 27].

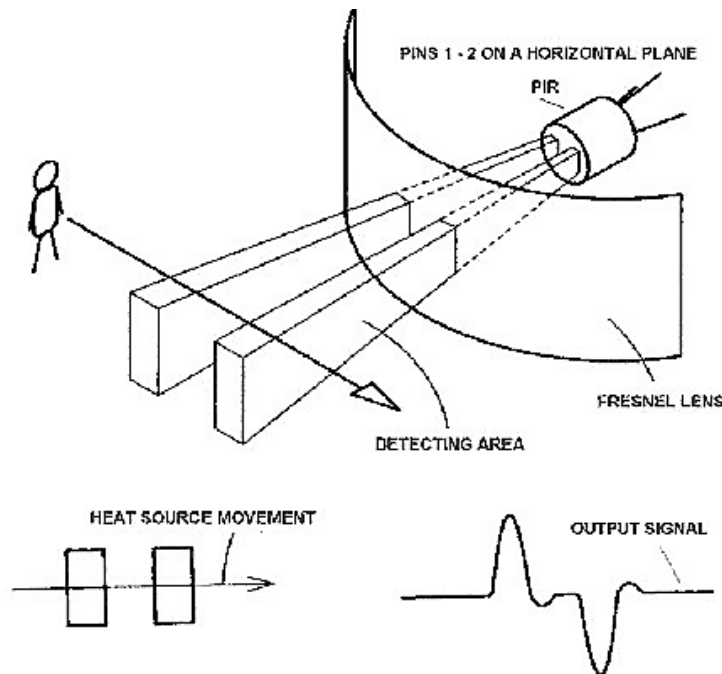


Рисунок 4.16 – Інфрачервоний датчик руху (проникнення за лінію розмежування) [26, 27]

Для того щоб порушник був виявлений ІЧ-пасивним датчиком, необхідне виконання наступних умов [26, 27]:

- порушник повинен перетнути в поперечному напрямку випромінювання зони чутливості датчика [26, 27];
- рух порушника має відбуватися в певному інтервалі швидкостей [26, 27];
- чутливість датчика має бути достатньою для реєстрації різниці температур поверхні тіла порушника (з урахуванням впливу його одягу) і фону (стіни, підлоги) [26, 27].

ІЧ-пасивні датчики складаються з трьох основних елементів (рис. 3.13):

- оптичної системи, що формує діаграму спрямованості датчика і визначає форму і вид просторової зони чутливості;
- піроприймаючий пристрою, що реєструє теплове випромінювання людини;
- блоку обробки сигналів піроприймаючий пристрою, що виділяє сигнали, обумовлені рухом людини, на тлі перешкод природного та штучного походження.

Системи, що використовують подібні БСПС, з різного роду датчиками, широко використовуються для цивільного призначання. Подібні БСПС з датчиками являються складовими системи «Розумний дім», що у свою чергу має змогу бути складовою КССВМВ «Інтернет речей» [26-26].

#### 4.3.4. Метод підвищення продуктивності та точності вимірювань кінцевих пристроїв

Задачею дослідження є збір інформації про географічне положення сенсорного приладу відносно інших та про стан передавання даних в БСПС та прийняття мір щодо покращення даного процесу. Це здійснюється шляхом комплексного застосування алгоритмів локалізації, аналізу якості сигналу, моніторингу даних, аутентифікації даних та реконфігурації параметрів БСПС.

Поставлена задача вирішується тим, що в безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому, що виконує функції

кінцевого пристрою (*E*), який містить сенсорний блок, що передає дані вимірювання на керуючий блок, який генерує повідомлення, в якому вказується інформація про географічне положення та якість сигналу, здійснюючи зворотній зв'язок, згідно з винаходом введено сенсорний блок визначання координат, який включений до керуючого блоку, а також елемент живлення, який теж включений до керуючого блоку [19, 36].

Введення в пристрій сенсорного блоку, та елемента живлення вигідно відрізняє запропонований пристрій підвищення безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому від прототипу, оскільки в прототипі відбувається лише прийняття рішення про зміну умов передавання даних за необхідністю. В запропонованому ж пристрої крім знаходження оптимальних рішень для подальшого передавання даних, також відбувається збір даних про положення даного сенсорного приладу відносно інших, що дає змогу вимірювати відстань між об'єктами БСПС, а також містить елемент живлення, що робить його автономним пристроєм. На (рис. 4.17) зображена структурна блок-схема безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому [19, 36].

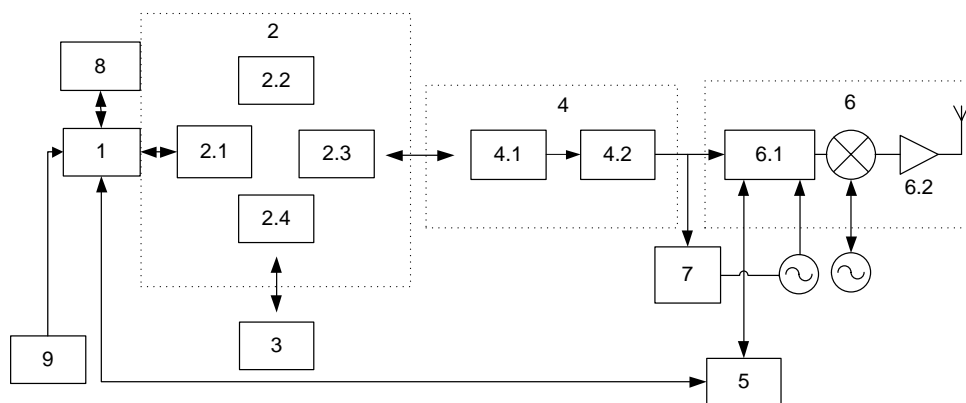


Рисунок 4.17 – Безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому (у якості кінцевого пристрою БСПС) [29]

Безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому містить керуючий блок 1, модуль підрівня LLC канального рівня моделі OSI 2, блоку хост інтерфейсу 2.1, вбудованого мікроконтролера 2.2, блоку додатку прийомо/передавальний пристрою 2.3, блоку шинного інтерфейсу 2.4, пам'яті 3, модулю підрівня MAC канального рівня OSI 4, контролера смуги частот 4.1, радіочастотного прийомо/передавальний пристрою 4.2, аналізатора сигналу 5 (роль якого має змогу виконувати мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-кутових величин на основі потужності сигналу), модуля фізичного рівня OSI 6, інтерфейсу фізичного рівня 6.1, антени 6.2., блоку автоматичного налаштування частоти 7, сенсорний блок 8, елемент живлення 9. Потужність, прийнята приймальною антенним пристроєм в моделі вільного простору визначається за формулою Фрісса для вільного простору [16, 19, 36].

Керуючий блок 1, здійснює керування живлення, а також надсилає команду про відправку пакета та сам пакет, що містить результати вимірювань, передані сенсорним блоком 8, що надійшли від сенсорного блоку, на модуль підрівня LLC канального рівня моделі OSI 2. В даному модулі через блок хост інтерфейсу 2.1, пройшовши відповідні перетворення, за допомогою додатків даного модуля, пакет стає фреймом. Після чого вбудований мікроконтролер 2.2 передає фрейм до блоку додатку прийомо/передавальний пристрою 2.3 та через блок шинного інтерфейсу 2.4 записує дані про стан передавання до пам'яті 3, де вони ще певний час зберігаються. Блок додатку прийомо/передавальний пристрою 2.3 спрямовує фрейм до модуля підрівня MAC канального рівня OSI 4. В даному модулі контролер смуги частот 4.1 підбирає для даного фрейму оптимальний діапазон частот, та спрямовує фрейм до радіочастотного прийомо/передавальний пристрою 4.2. В даному модулі відбувається як перетворення фрейму у електромагнітні коливання та й їх модуляція відповідно до вмісту фрейму. Після цього коливання передаються до модулю фізичного рівня OSI 6, а інформація про підібраний блоком 4.1 діапазон частот передається до блоку автоматичного налаштування частоти 7. Блок 6.1

накладає електромагнітні коливання на частоту, яка налаштовується блоком автоматичного налаштування частоти 7. Коливання спрямовуються до антени 6.2, яка передає сигнал до радіоефіру [19, 36]. Радіообмін відбувається у смузі частот 2400 – 2483,5 МГц ISM-діапазону. У радіотракті застосований метод розширення спектру шляхом імпульсної перебудови частоти (*FHSS – Fast rate frequency hopping*) і дворівнева частотна модуляція з фільтром Гауса (*GFSK – Gaussian Frequency Shift Keying*). Імпульс – моноцикл Гауса описується функцією (4.9) [16, 19, 36, 45]:

$$V(t) = A \frac{\sqrt{2e}}{\tau} t e^{-(1/\tau)^2} \quad (4.9)$$

де  $A$  – амплітуда імпульсу;  $\tau$  – часова константа, що характеризує затухання (тривалість імпульсу  $2\pi\tau$ ). Спектральна щільність сигналу визначається функцією 4.10) [36, 45]:

$$V(\omega) = A\omega\tau^2\sqrt{2\pi e} \quad (4.10)$$

Центральна значення частоти сигналу обчислюється за формулою [36, 45]:

$$f_c = 2\pi\tau$$

Метод частотних імпульсів передбачає, що вся відведена для передавання смуга частот ділиться на певну кількість підканалів шириною 1 МГц кожен. Канал являє собою псевдовипадкову послідовність імпульсів по 79 або 23 радіочастотних підканалів [30, 36, 45].

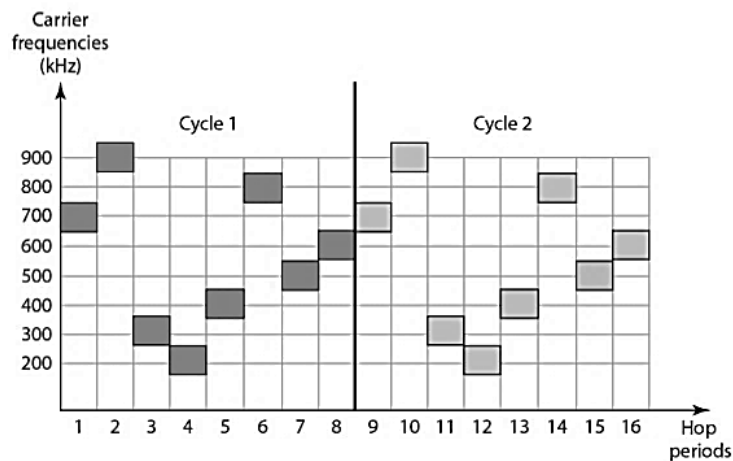


Рисунок 4.18. – Графік циклів алгоритму FHSS [36, 45]

Кожен канал поділяється на тимчасові сегменти тривалістю 625 мкс, причому кожному сегменту відповідає певний підканал. Передавальний пристрій в кожен момент часу використовує тільки один підканал. Ці імпульси здійснюються синхронно в передавальний пристрій і приймаючий пристрій в заздалегідь зафіксованої псевдовипадковою послідовністю [36, 45].

За секунду має змогу відбуватися до 1600 частотних імпульсів. Потужність передавальний пристрою ділиться на 3 класи: 1) 100 мВт (20 дБм); 2) 2.5 мВт (4 дБм); 3) 1мВт (0дБм). Такий метод забезпечує конфіденційність і деяку завадостійкість передавання [36].

Аналізатор сигналу 5 постійно відстежує інформацію про стан передавання даних. Він відсилає відповідні запити до інтерфейсу фізичного рівня 6.1 та отримує від нього інформацію про стан передавання даних 36.

Далі опишемо метод згорткового (*PBSS*) кодування, як технологію для покращення якості передавання даних при падінні стану сигналу. Даний метод рекомендується для застосування в пристрої рис. рис. 4.16 [36].

Ідея згорткового кодування полягає в наступному. Послідовність вхідних інформаційних бітів, перетвориться в згортковому кодері так, щоб кожному вхідному біту відповідало більш ніж вихідний. Тобто згортковий кодер додає певну надлишкову інформацію до початкової послідовності [36].

Якщо, приміром, кожному вхідному біту відповідають два вихідних, то говорять про згорткове кодування із швидкістю  $r = \frac{1}{2}$  [36].

Якщо ж кожним двом вхідним бітам відповідають три вихідних, то швидкість згорткового кодування складатиме вже  $\frac{2}{3}$  [6, 7, 36].

Будь-який згортковий кодер будується на основі декількох послідовно пов'язаних запам'ятовуючих осередків і логічних елементів *XOR* [36].

Кількість осередків визначає кількість можливих станів кодера [36].

Якщо, приміром, у згортковому кодері використовується шість осередків, то в кодері зберігається інформація про шість попередніх станів сигналу, а з урахуванням значення вхідного біта, отримаємо, що в такому кодері

використовується сім бітів вхідної послідовності. Такий згортковий кодер називається кодером на сім станів ( $K = 7$ ) [36].

Вихідні біти, що формуються в згортковому кодері, визначаються операціями *XOR* між значеннями вхідного біта і бітами, що зберігаються в осередках, що запам'ятовують, тобто значення кожного формованого вихідного біта залежить не лише від інформаційного біта, що входить, але і від декількох попередніх бітів [36].

У технології *PBSS* використовуються згортковому кодері на сім станів ( $K = 7$ ) із швидкістю  $r = 1/2$ . Схема такого кодера показана на рис 4.19 [36].

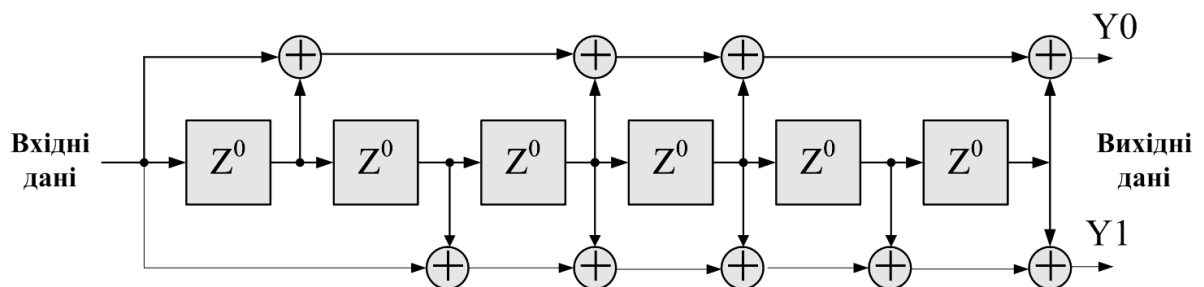


Рисунок 4.19. – Схема згорткового кодера, що застосовується в кодуванні *PBSS* ( $K = 7$ ,  $r = 1/2$ ) [36]

Головною перевагою згорткових кодерів є завадостійкість формованої ними послідовності: навіть у разі виникнення помилок прийому початкова послідовність бітів має змогу бути безпомилково відновлена [31-35, 36].

Для відновлення початкової послідовності бітів на стороні приймаючий пристрою застосовується декодер Витербі [36].

Далі дослідимо особливості даного пристрою при його роботі в БСПС.

При допомозі засобу моделювання безпроводних систем спеціального призначення *Motorola lan planer*, розрахуємо зниження дальності передавання даних, в залежності від механічних перешкод, а також мають зв'язок з цим втрати пропускної спроможності [36].

На основі одержаних результатів побудуємо графік (Рис. 4.20) [36].

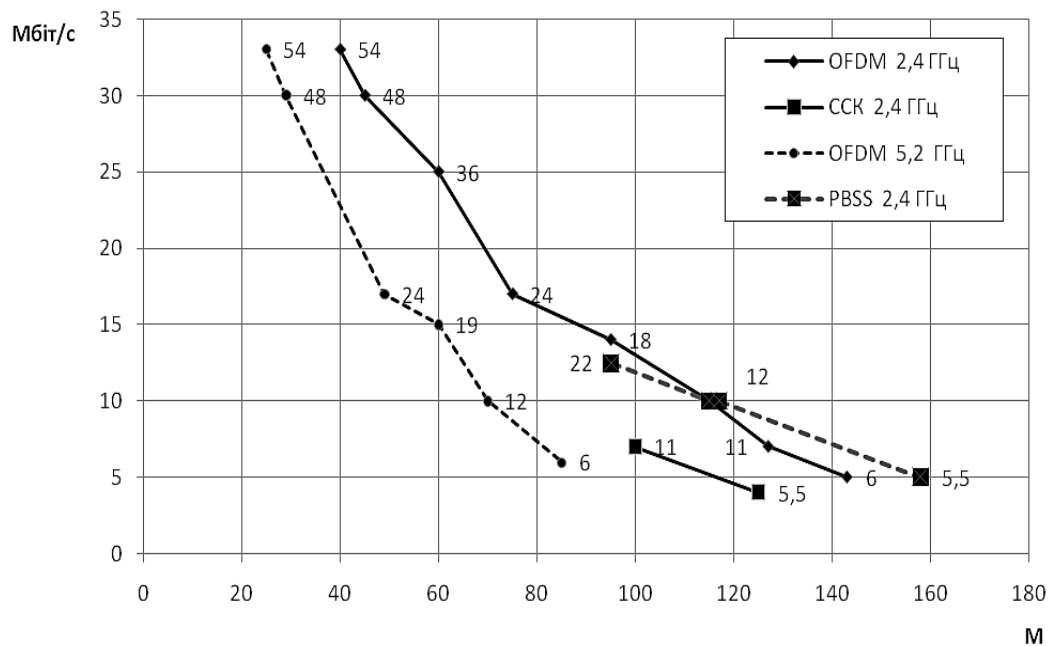


Рисунок 4.20. –Залежність фактичної швидкості передавання від дальності

На даному графіку видно, що при переході на метод кодування *PBSS*, 2,4 ГГц (виділено жирним шрифтом), дальність вимірювання збільшується у порівнянні з технологією *OFDM*, 2,4 ГГц, приблизно на 15 – 17 м. Для пристроїв, що при цьому залишаться працювати на стандарті *IEEE* 802.15.4, фактична швидкість передачі показників вимірювання буде сягати майже 18 Мбіт/с [36].

На основі цього можна сказати, що введення в пристрій передавання даних додаткового блоку цілком виправдане, щодо питання збільшення дальності передавання показників вимірювань.

На рівні черг каналу передачі даних даного пристрою, запропоновано модель одноканального зв'язку (так, як даний пристрій має зв'язок лише з 1 сусіднім), результати роботи якої б відображали часові та кількісні параметри передавання даних вимірювання механічних відстані [16].

Імітаційну модель подано відкритою одноканальною системою масового обслуговування. Модель, за класифікацією Кендала, є моделлю класу  $G/M/1$  з дисципліною (алгоритмом обслуговування заявок) *FIFO*. Час затримки бітів в каналах передавання ( $W_{черги}$ ) даної системи буде визначатись у відповідності до



формули для обчислення часу затримки в черзі одноканального пристрою з очікуванням [16, 19]:

$$W_{\text{черги}} = \frac{L_{\text{черги}}}{\sum_{i=1}^N \lambda_i (1 - P_N)}, \quad (4.11)$$

де  $L_{\text{черги}}$  – середня кількість бітів, що передаються, визначається за наступною формулою [16]:

$$L_{\text{черги}} = \sum_{i=1}^N n P_n,$$

де  $P_n$  – імовірність того, що в каналі інфрачервоного передавання даних знаходиться  $n$  бітів і визначається за формулою [16]:

$$P_n = P_0 \sum_{i=1}^N \rho_i^n,$$

де  $P_0$  – імовірність того, що підканал на даний момент зайнятий, визначається за формулою [16]:

$$P_0 = \frac{1 - \sum_{i=1}^N \rho_i^n}{1 - \sum_{i=1}^N \rho_i^{n+1}},$$

де  $\rho$  – навантаження на БСПС, що визначається за формулою (4.11). Підставивши дані значення у формулу (3), отримаємо наступну результуючу формулу [16, 37]:

$$W_{\text{черги}} = \frac{\sum_{n=0}^N n \frac{1 - \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu}}{1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu}\right)^{N+1}} \left(\frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu}\right)^n}{\sum_{i=1}^N \lambda_i (1 - P_N)}.$$

Інформацію про стан передавання даних аналізатор сигналу 5 передає до керуючого пристрою 1, після чого відбувається прийняття рішення про зміну умов передавання даних за необхідністю, елемент живлення 9, через керуючий

блок 1, здійснює живлення постійним електричним струмом безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому, що забезпечує його автономність та функціональність на протязі тривалого періоду часу [16, 30, 36, 37, 45].

#### **4.4. Технологія «Розумний будинок»**

Система "Розумний Дім" забезпечує механізм централізованого контролю та інтелектуального управління в житлових, офісних або громадських приміщеннях [38, 43, 44, 46, 47, 48].

З інсталяцією подібної системи вдома чи на роботі кожен користувач отримує можливість в рамках загального середовища проживання задавати параметри власного індивідуального середовища (світло, температура повітря, звук і т.д.), в т.ч. порядок роботи системи [43, 44, 46, 47, 48]:

- Здійснювати управління необхідною системою (освітлення, клімат, відеоспостереження тощо) [43, 44, 46, 47, 48];
- Отримувати доступ до інформації про стан всіх систем життєзабезпечення будинку (перебуваючи всередині нього або віддалено) [43, 44, 46, 47, 48];

Загальна схема системи управління комп'ютеризованою сенсорною системою вимірювання механічних величин "Розумний будинок" виглядає наступним чином [43, 44, 46, 47, 48]

- Центральний процесор управління / головний блок управління;
- Датчики (температури, освітленості, задимленості, руху та ін.);
- Керуючі пристрої (диммери, реле, ІЧ-емітери та ін.);
- Інтерфейси управління (кнопкові вимикачі, пульти ІК і радіопульт, сенсорні панелі, web / wap інтерфейс);
- Власна комп'ютеризована приладова система управління, що об'єднує вищевказані елементи;
- Керовані пристрої (світильники, кондиціонери, компоненти домашнього кінотеатру та ін.);

- Допоміжні БСПС (Ethernet, телефонна мережа, дистрибуція аудіо і відеосигналу);
- Програмне забезпечення проекту [43, 44, 46, 47, 48].

Основна функція центрального процесора – управління підпорядкованими йому пристроями з використанням наступних інтерфейсів: Ethernet, RS-232, RS-485, IR, аналогових і цифрових входів/виходів та ін. [46, 47, 48]

Також центральний процесор управління містить багатозадачну операційну систему, інструментальні засоби програмування і в деяких випадках Web сервер [43, 44, 46, 47, 48].

Датчики розташовуються в певних місцях квартири, які безпосередньо або через проміжні пристрої зв'язані єдиною БСПС [43, 44, 46, 47, 48].

Інтерфейси управління здійснюють загальне управління системами "Розумний будинок"[43, 44, 46, 47, 48].

По власній БСПС інформація від датчиків або інтерфейсів надходить до центрального процесора управління [43, 44, 46, 47, 48].

Програмне забезпечення центрального процесора обробляє отриману інформацію і генерує команди для керуючих пристроїв. Команди надходять як з власної БСПС, так і з допоміжної [43, 44, 46, 47, 48].

Способи генерації команд, а також форма і склад відображуваної інформації про стан систем закладається на етапі розробки програмного забезпечення з урахуванням вимог проекту [43, 44, 46, 47, 48].

Система управління являє собою сукупність апаратних та програмних засобів, які насамперед націлені на економічність, тобто на зниження можливих розходів (електроенергія, тепло) користувача, а також надає додаткові можливості, як у випадку з, контроль присутності [39, 43, 44, 46, 47, 48].

Розглянемо всі функції більш детально. Також Розумний Дім – це складова поняття – «Інтернет речей» рис.4.21. [43, 44, 46, 47, 48]

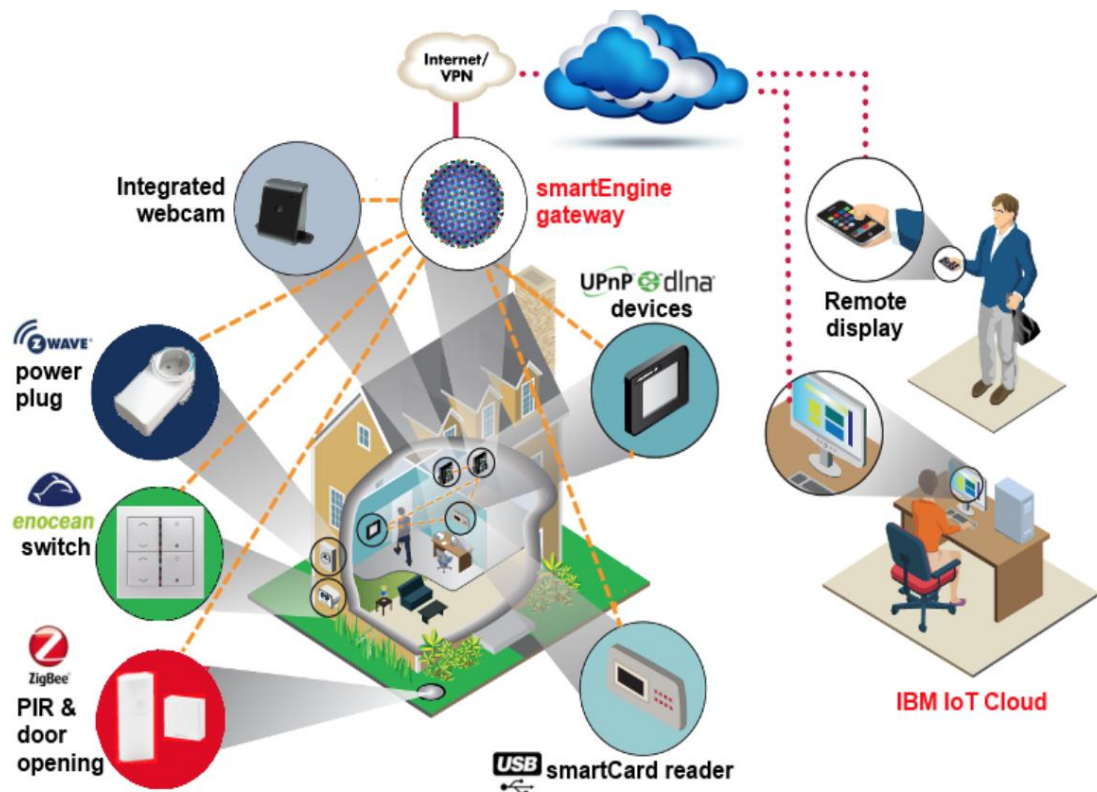


Рисунок 4.21 – Структура КССВМВ «Інтернет речей» [43, 44, 46, 47, 48]

**Енергозбереження.** Енергозберігаюча система управління освітленням в багатоповерхових будинках (під'їзди, автостоянки, прибудинкові території, підвали, горища) дозволить знизити кількість споживаної електроенергії в 10-15 разів. У цих системах застосовується пристрій управління освітленням з роздільними силовими компонентами, що дозволяє використовувати існуючі лінії електропередач. Енергозберігаюче освітлення починається з намагання упорядкування часу роботи освітлювальних приладів. Ефективний захід енергозбереження – централізація управління освітленням з використанням спеціально розроблених графіків включення і виключення світла. Певну економію можна отримати за рахунок максимального використання всередині приміщення природного світла. Це досягається за рахунок правильного планування будівлі і використовуваних приміщень. Великий ефект дає використання енергозберігаючих ламп. Однак навіть сама «економна» лампа, якщо вона горить в порожньому приміщенні, стане безглуздим джерелом енерговитрат. Найкраще енер-

гозбереження забезпечують автоматичні вимикачі світла з використанням інфрачервоних та електронних датчиків [43, 44, 46, 47, 48].

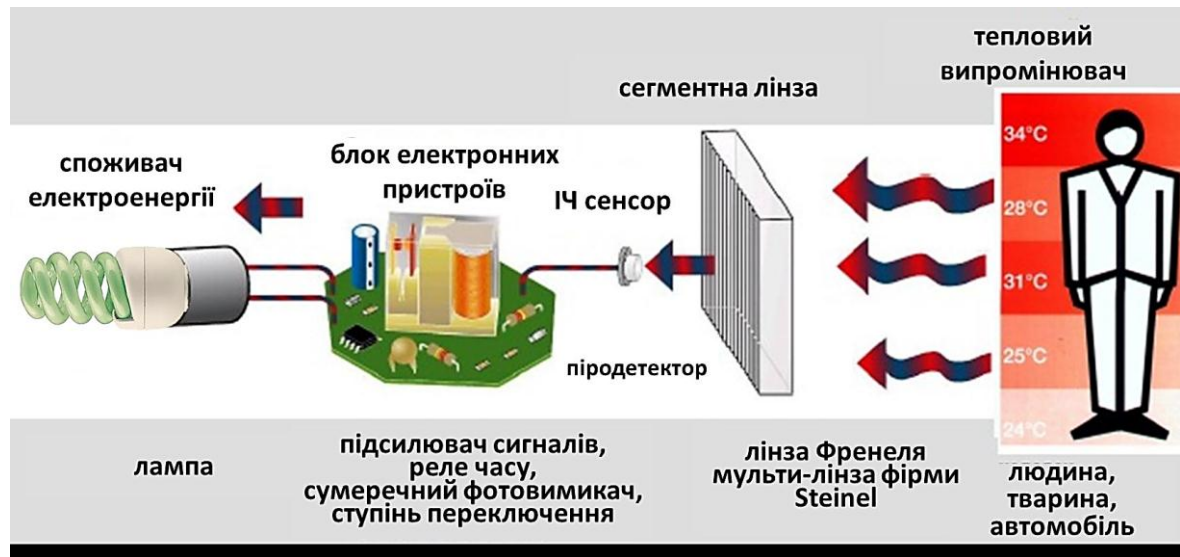


Рисунок 4.22 – Принцип роботи датчика руху

Електронні датчики вимірюють рівень освітленості приміщення і, при досягненні потрібного показника, відправляють сигнал на увімкнення або вимкнення світла (сенсори освітлення), або безпосередньо «ловить», як у приміщення увійшов чоловік, і вмикають світло (датчики руху). Світлочутливий елемент забороняє включення світла при достатній кількості сонячного світла. Тому що відмінністю від сенсорів реле, на основі часу, сенсори руху задіють освітлення лише під час фактичного знаходження людини в кімнаті, а енерговитрати на світло мають імовірність знизитись у декілька разів [43, 44, 46, 47, 48].

Для сходових кліток, коридорів і ліфтових холів економія додатково збільшується за рахунок поетажного управління освітлювальними приладами. В енергозберігаючих вимикачах освітлення застосовуються також інфрачервоні датчики руху з урахуванням планування приміщення [39, 47, 48]. Наступні електронні сенсори (давачі знаходження) можуть визначати присутність людей в кімнаті і тільки в такій ситуації залишають освітлення увімкненим. Сенсор інфрачервоних променів «ловить» лише як рухається людини, хоча цей рух має змогу реагувати і на команди – як у випадку з, помах рукою або кивок головою.

При великому часі затримки інфрачервоний датчик працює в режимі датчика руху, тобто підтримує освітлення при тривалому знаходженні людей в будинку. При застосуванні інфрачервоних датчиків, як датчиків руху в прохідних кімнатах, налаштовується невеликий час затримки. Електронна регуляція освітлення має змогу здійснюватися як автономно, так і в складі автоматизованої управляючої системи, яка нині називається «розумний будинок» рис. 4.23 [43, 44, 46, 47, 48]

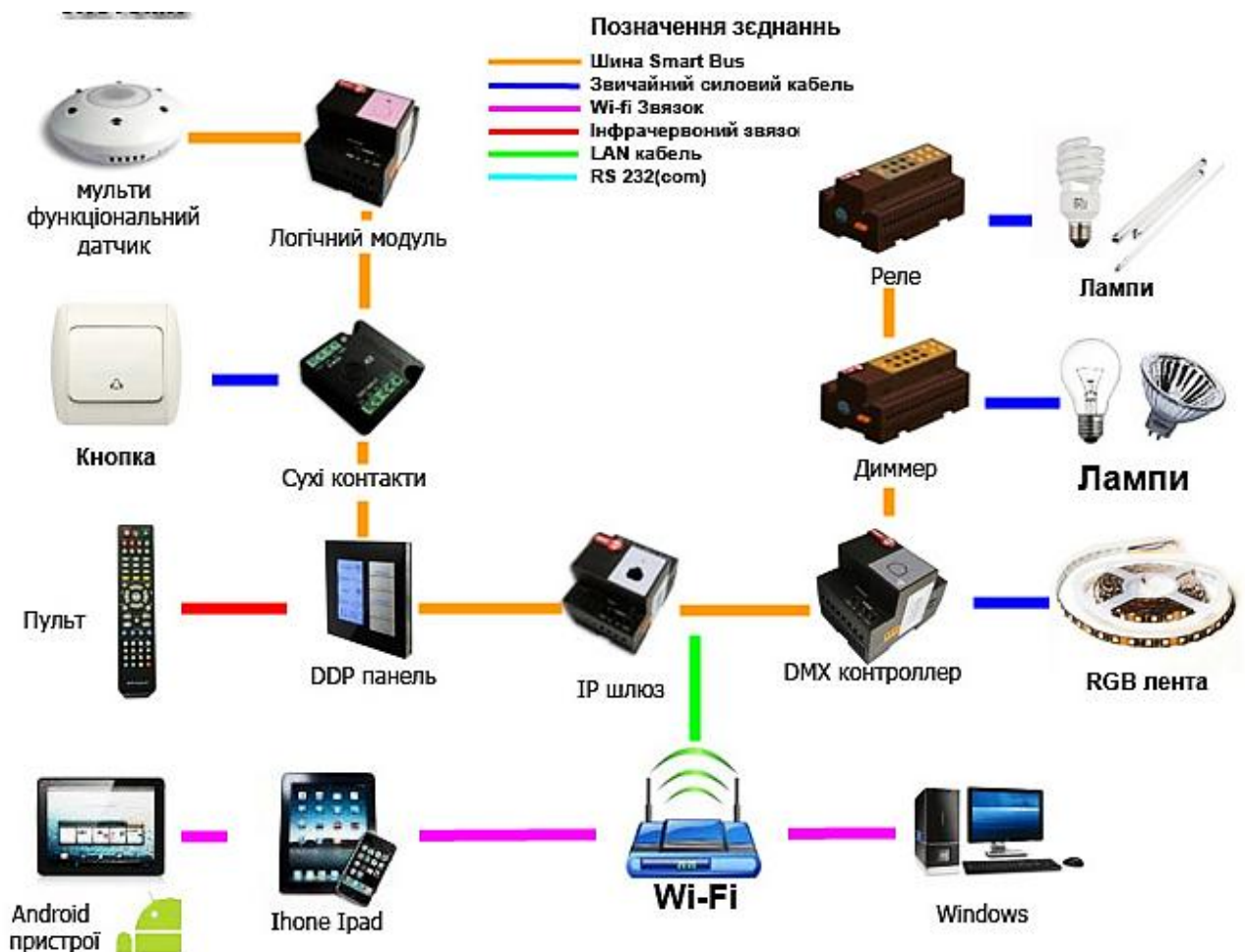


Рисунок 4.23. – БСПС керування освітленням [43, 44, 46, 47]

**Система клімат-контроль.** Така система клімат-контролю працює на підставі методів, що лежать в її основі, це дає змогу здійснювати підтримку встановлених норм мікроклімату, а також є можливість розбивати приміщення на окремі мікрокліматичні зони, з мінімальною витратою енергетичних ресурсів [43, 44, 46, 47, 48].

В основі системи енергозбереження лежить температурний контролер (Рис. 3.24) і електроконвектори, що мають сучасний дизайн та доступні ціни [43, 44, 46, 47, 38].

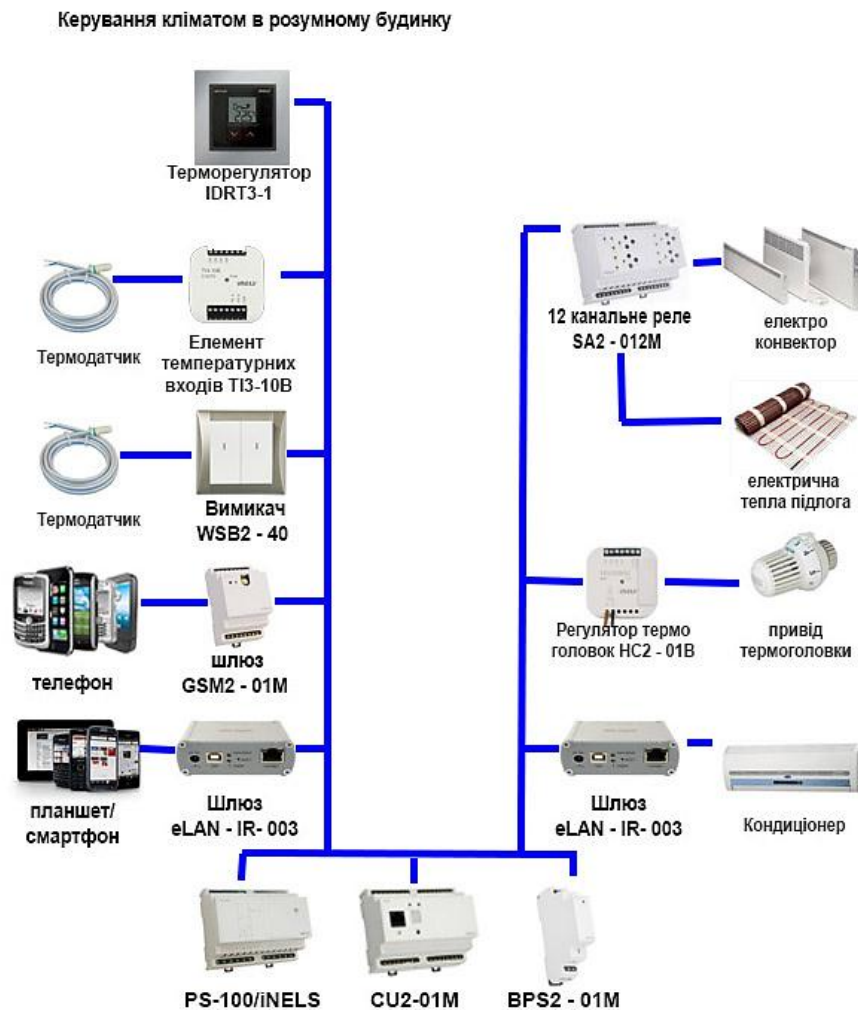


Рисунок 4.24. – БСПС керування кліматом [43, 44]

Ці системи не поглинають кисень, не знижують вологість повітря, захищені від пожежі. Також, обігрівачі можна замінити нагрівальними провідниками (тепла підлога), плівкові панелі з інфрачервоними нагрівачами, універсальні і можуть працювати з будь-якими нагрівальними приладами. В системах, що використовують опалення на одній основі, датчики можуть управляти кранами з електроприводом або електроклапанами, що встановлюються на трубах опалення [43, 44, 46, 47, 48].

У пультовому електрощиті встановлюються автоматичні перемикачі для захищеності всіх складових частин розумного будинку від пікового струму і



перегорання, а також центральні автоматичні пристрої (СИУ-4, СИУ-1). Системою керує контролер температури на основі показників відповідних сенсорів і розеток керування. З'єднання блоків системи здійснюються 100 метровим телефонним кабелем [43, 44, 46, 47, 48].

Описана технологія дає можливість гарантувати вирішення різних задач. За її допомоги організовується обігрів або кондиціонування. Разом з цим одночасно вмикається кондиціонер і опалювальна система. Виняток має змогу скласти система підігріву підлоги, система підтримує сталу температуру в нижній частині приміщення, за допомогою кондиціонера [43, 44, 46, 47, 48].

Ця система здатна забезпечувати зниження температурного режиму під час сну в безлюдних приміщеннях і спальнях, це дозволить створення комфортних умов для сну, а також економити енергоресурси. Крім того, вона дає можливість мінімізувати роботу апаратури і обладнання під час відсутності господарів за допомогою використання режимів роботи «денна відсутність» і «відпустка». При включенні другого режиму проводиться повне відключення системи кондиціонування та провітрювання, а система опалювання встановлюється на мінімальні налаштування потужності. Перед поверненням додому можна завчасно встановити в приміщеннях комфортний режим клімату шляхом управління системою контролю клімату телефоном або через інтернет. Рис 3.20.[40, 43, 44, 46, 47, 48]

Таким чином, система клімат-контролю «розумного будинку» дозволяє створити здоровий і комфортний мікроклімат для затишного проживання в будинку [43, 44, 46, 47, 48].

**Контроль проникнення.** Постановка і зняття квартири з охорони виробляються за сприянням кодового пульта, розміщеного у передпокої. При відчинення головних дверей у людина має 30 секунд для набору шифру «ключа». Якщо ж шифр не буде набраний, розумний будинок увімкне звукове сповіщення і надішле СМС сповіщення по кільком телефонним номерам. Рухові сенсори, що знаходяться на кухні, спальні і вітальні спроможні визначити вхід злоумисника через вікна. Виходячи з квартири досить набрати



потрібну комбінацію на пульті охорони і розумний будинок не тільки увімкне звукове сповіщення, але і вимкне світло, переключить опалювальну систему в енергозберігаючий режим [41, 43, 44, 46, 47, 48].

**Контроль протікання води.** Прорив труб водопостачання є дуже неприємною подією у зв'язку з псуванням не тільки свого, але і сусідського майна. Виявити і запобігти витоків води так само допомає змогу розумний будинок. Контрольованими зонами є санвузлові пристрої та кухня, тобто ті приміщення, де проходять труби водопостачання. Прорив труби або перелив води через край раковини фіксується за допомогою спеціальних датчиків. У випадку протікання розумний будинок перекриє доступ води в квартиру і відправить СМС повідомлення на задані телефони [42, 43, 44, 46, 47, 48].

#### **Висновки до розділу 4**

1. Запропоновано математичну модель, на основі формули Фрісса, для визначення позицій сусідніх пристроїв, шляхом вимірювання падіння потужності сигналу, враховуючи ряд факторів, що можуть впливати на радіоефір [1].

2. Побудовано аналітичну модель визначання відстані між сенсорними прийомопередавальний пристроями, на основі часу прибуття сигналу.

3. Проведено оцінку похибки часу прибуття сигналу, з урахуванням перешкод, а також визначено основні параметри, що на неї впливають.

4. Проведено аналіз видів пристроїв БСПС, їх основні відмінності, а також запропоновано варіант схеми включення їх в приладову систему.

5. Розроблено математичну модель для дослідження процесу обслуговування заявок в чергах каналів передавання показників вимірювань БСПС, що дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю [16].

6. Запропоновано алгоритм, що об'єднує нижні рівні еталонної моделі OSI, у поєднанні з розширенням стандартної смуги частот, що покращило швидкість передачі показників вимірювань майже на 200 Кбіт/с [16].

7. Модернізовано структурну схему маршрутного пристрою БСПС, функціонально об'єднавши блоки, що відповідають нижнім рівням еталонної моделі OSI.

8. Запропоновано удосконалити принцип роботи маршрутного пристрою БСПС, включивши до його складу алгоритм, який має за основу перерозподіл показників продуктивності каналу передачі часу [30, 36, 37, 45].

9. Виявлено, що метод вимірювання відстані за допомогою лазерного далекоміра, що включає нівелювання, здатний крім відстані також вимірювати кут між лазерним далекоміром та ціллю. Це дає можливість оцінити положення цілі в просторі.

10. Модернізовано структурну пристрою координатора БСПС, шляхом включення в її склад блоків лазерного далекоміра. В який саме спосіб? Що принципово нового є в цій модернізації? Що дає можливість отримати альтернативне значення відстані між об'єктами.

11. Розроблено модель кінцевого пристрою БСПС, що відрізняється тим, що сенсорний блок дає змогу надавати керуючому блоку дані про географічне положення, а також елемент живлення, що забезпечує автономність пристрою.

12. Запропоновано використовувати в метод вимірювання відстані між об'єктами, на основі падіння рівня радіосигналу між сенсорного пристрою БСПСми, застосовуючи мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно кутових величин на основі падіння потужності сигналу, в сенсорному комп'ютеризованому приладу вимірювання відстані.

13. Розглянуто застосування методу перебудови частоти (FHSS – Fast rate frequency hopping) і дворівневу частотну модуляцію з фільтром, що працює за методом Гауса (GFSK), для радіообміну показниками вимірювань в БСПС.

14. Запропоновано концепцію застосування комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин у системі "Розумний будинок" та описано принципи функціонування його основних систем.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Дуднік А.С. Методи обчислення потужності для визначення відстані між об'єктами на основі падіння рівня сигналу [Текст] / А. С. Дуднік // Актуальні проблеми сучасної науки: XXXII міжнар. наук.-практ. конф., 31 липня 2018 р.: тези допов. – Санкт-Петербург–Астана–Київ–Відень., 2018. – С. 71 – 72. (РИНЦ) – Режим доступу: <https://www.inter-nauka.com/uploads/public/15335344147566.pdf>

2. He T., Huang C., Blum B. Range-free localization schemes for large scale sensor networks [Текст] // In MobiCom '03: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, New York, 2011, ACM Press, New York. – P. 81–95.

3. Derivation of Friis Transmission Formula [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>. The Friis Equation – Назва з титул. екрану.

4. Savvides A., Han C. Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors [Текст] // In 7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2010. – P. 166–179.

5. Дуднік А.С. Аналітична модель вимірювання відстані за допомогою сенсорних мереж та оцінка похибки вимірювання [Текст] / А.С. Дуднік, В.П. Квасніков // Вісник Черкаського державного технологічного університету . – 2018. – Вип. №2 . С. 21 -26.

6. Derivation of Friis Transmission Formula [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>. The Friis Equation – Назва з титул. екрану.

7. Savvides A., Han C. Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors [Текст] // In 14th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2017. – P. 166–179.

8. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice, 15th edition [Текст]// Springer-Verlag, Berlin. – 2014.

9. Elson J. Time synchronization in wireless sensor networks [Текст] // Department Computer Sciences, University of California, Ph.D. dissertation, Los Angeles. – 2014.

10. Whitehouse K. The design of calamari: An "кожен з кожним" localization system for sensor networks [Текст]// M.S. thesis, University of California at Berkeley. – 2015.

11. Priyantha N., Balakrishnan H., Teller.S. The cricket compass for context aware mobile applications [Текст]// In 17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy, July 2016. – P. 325.

12. Дуднік А.С. Аналіз пристроїв безпроводних вимірювальних сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Актуальні проблеми сучасної науки: XXXI міжнар. наук.-практ. конф., 29 червня 2018 р.: тези допов. – Москва–Астана–Харків–Відень., 2018. – С. 71 – 72. **(РИНЦ)**

13. Callaway E.H. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. – New York: CRC Press LLC, 2004. 350 p.

14. Rishi Pidva “Security in Wireless Sensor Networks” March 3 2003 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.cs.wmich.edu/wsn/doc/spins/Pidva\\_SPINS.pdf](http://www.cs.wmich.edu/wsn/doc/spins/Pidva_SPINS.pdf) Security in Wireless Sensor Networks – Назва з титул. екрану.

15. Institute of Electrical and Electronics Engineers / Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology — telecommunications and Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements — Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) [Текст]. New York: IEEE Press. – 2003. – P. 250.

16. Дуднік А.С. Розробка методу підвищення продуктивності сенсорних мереж вимірювання відстані [Текст] /А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 3/2 (41). – С.114 -118. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.135486> **(Index Copernicus, DOAJ,**

**WorldCat, BASE, РИНЦ** – Режим доступу:  
<http://journals.uran.ua/tarp/article/download/135486/143721>

17. Дуднік А.С. Метод застосування протоколу БТР для надійності передачі даних безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко// Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. № 3 (43). – С. 22 – 26. **(РИНЦ, WorldCat, BASE)**

18. Дуднік А.С. Динамічний алгоритм у перерозподілу потоку заявок в безпроводових комп'ютерних мережах [Текст] /А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2016. – Вип. № 4. – С. 102-104.

19. Дуднік А.С. Система покращеного передавання даних безпроводових комп'ютерних мереж стандарту IEEE 802.11. [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко// Наука і молодь: збірник наукових праць. – К.: НАУ, 2012. – Вип. № 11(12). – С. 113-116. – Режим доступу:  
[jrnل.nau.edu.ua/index.php/NM/article/download/3412/3384](http://jrnل.nau.edu.ua/index.php/NM/article/download/3412/3384)

20. Дуднік А.С. Спосіб підвищення продуктивності безпроводових комп'ютерних мереж на основі міжрівневої взаємодії та пристрій для його реалізації [Текст] / А.С. Дуднік, Є.В. Шевцова, О.О. Зубарева // Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2011. – Вип. № 4 (36). – С. 45 – 50. **(РИНЦ, WorldCat, BASE)**

21. Dudnik A. Models and methods of growth of productivity of wireless networks in components of computerized systems of measurement of mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Sciences of Europe. – 2018. # 29. Vol. 2. P. 54 -60. **(DIIF, eLIBRARY.RU, GIF, Calameo, ISSUU, Slideshare)** (Praha, Czech Republic)

22. Патент №60400 (Україна), МПК H04B 7/005. Пристрій підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю [Текст] / А. С. Дуднік, Є.В. Шевцова, М.М. Яценко, О.О. Зубарева. – Реєстрац. номер заявки 201007469. Опубліковано в бюлетені №12 від 25.06.2011.

23. Патент №69626 (Україна), МПК Н04В 7/005. Безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок [Текст] / А. С. Дуднік, В.П. Якунін. – Реєстрац. номер заявки 201111748. Опубліковано в бюлетені №9 від 10.05.2012.

24. Дуднік А.С. Будова та принцип роботи комп'ютеризованого лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А.С. Дуднік // Теорія і практика сучасної науки: III міжнар. наук.-практ. конф., 29 – 30 червня 2018 р.: тези допов. – Київ., 2018. – С. 100 – 102.

25. Дуднік А.С. Дослідження лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 4/2 (42). – С.35 -40. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141190> (**Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE, РИНЦ**)

26. Дуднік А.С. Рекомендації щодо застосування «пристрою підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю» та датчиків руху у військових цілях [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Кравченко, В.П. Квасніков // Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні Збройних Сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель: наук.-практ. конф., 30 листопада 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – С. 106 – 108.

27. Dudnik A. Method of devices wireless sensor networks and motion sensors for military purposes [Текст] / A.Dudnik, O. Cholishkina, Yu. Bondarenko // East European Science Journal. – 2018. # 6(34). Vol. 1. P. 37 -41. (**eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI, Slideshare, Cosmos impact factor**) (Warsaw, Poland)

28. Dudnik A. Analysis of technology "internet of things" in the military sphere [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Colloquium-journal. – 2018. # 8(19). Vol. 1. P. 16 -19. (**Index Copernicus, РИНЦ, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (Warsaw, Poland)

29. Дуднік А.С. Аналіз сенсорного мережевого приладу вимірювання відстані між об'єктами [Текст] / А.С. Дуднік, О.Г. Чолишкіна, М.Г. Луцький //

Інноваційний розвиток науки нового тисячоліття: III міжнар. наук.-практ. конф., 25 – 26 травня 2018 р.: тези допов. – Чернівці., 2018. – С. 135 – 137.

30. Дуднік А.С. Модель сенсорного комп'ютеризованого приладу вимірювання відстані [Текст] / А.С. Дуднік, В.П. Квасніков // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 1 (81). – С.114 -118. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-114-118](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-114-118) (Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE)

31. Кузьмин Л.В., Морозов В.А. Статистические характеристики ансамбля сверхширокополосных линий связи в условиях многолучевого распространения внутри помещений [Текст], РиЭ, 2009, т. 54, №3, С. 329–338.

32. Кузьмин Л.В., Морозов В.А., Старков С.О., Хаджи Б.А. Анализ помехоустойчивости приема сверхширокополосных хаотических сигналов в условиях многолучевого распространения внутри помещений [Текст], РиЭ, 2006, Т. 51, №11, с. 1360–1367.

33. Jay Martin Mineo Takai and Rajive Bagrodia. Effects of wireless physical layer modeling in mobile "кожен з кожним" networks [Текст]. In Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile "кожен з кожним" networking and computing, pages 87 – 94, 2008.

34. Jim Geier Wireless Networks first-step [Текст] – Indianapolis: Cisco Press: 2005. – 189 pp.

35. Judd, G.; Steenkiste, P., "Design and implementation of an RF front end for physical layer wireless network emulation" [Текст] Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th , vol., no., pp.974-979, 22-25 April 2007

36. Дуднік А. С. Методи підвищення продуктивності пристроїв безпроводних вимірювальних сенсорних мереж [Текст] // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2018. — №12. С. 41 -46. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-12-3993> (РИНЦ, ScholarGoogle, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus) – Режим доступу: <https://www.inter-nauka.com/uploads/public/15305254967675.pdf>

37. Дуднік А.С. Динамічний алгоритм управління перерозподілом мережевого трафіку у безпроводових інформаційних системах [Текст] / А. С. Дуднік // Проблеми модернізації України. – 2015. – Вип. № 1. – С. 126 -129.

38. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-99-2000.

39. НПАОП 0.00-1.28-10 “Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ” – Держгірпромнагляд, № 65 від 26 березня 2010 р.

40. Dudnik A. The concept of a sensory network measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik // International scientific journal "Internauka". — 2018. — №10. Vol. 2. P. 7 -10. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-10-3889> **(РИНЦ, ScholarGoogle, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

41. Dudnik A. The concept of measuring mechanical quantities in "smart home" technology [Текст] / A. Dudnik, V. Lyudvychenko // Проблеми модернізації України. – 2018. – Вип. № 6. – С. 150 -151.

42. Dudnik A. The role of technology of professional interaction of "Internet Things" when measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Молодий вчений. — 2018. — №2. С. 15 -19. **(РИНЦ, ScholarGoogle, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

43. Дуднік А.С. Застосування датчиків вимірювання механічних величин в комп'ютерній БСПС «розумний дім» [Електронний ресурс] / А.С. Дуднік // Метрологія і інформаційно-вимірювальна техніка: міжнар. наук.-практ. конф., 22 листопада 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – Режим доступу: [http://imt.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/11/ZASTOSUVANNYA-DATCHYKIV-VYMIRYUVANNYA-MEHANICHNYH-VELYCHYN-V-KOMP-YUTERNIJ-MEREZHI-ROZUMNYJ-DIM\\_.pdf](http://imt.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/11/ZASTOSUVANNYA-DATCHYKIV-VYMIRYUVANNYA-MEHANICHNYH-VELYCHYN-V-KOMP-YUTERNIJ-MEREZHI-ROZUMNYJ-DIM_.pdf)

44. Дуднік А.С. Застосування датчиків вимірювання механічних величин в комп'ютерній БСПС «Розумний дім» [Текст] /А.С. Дуднік // Метрологія та прилади . – 2017. – Вип. № 5. – С.106 -110. **(Index Copernicus)**

45. Дуднік А. С. Метод побудови комп'ютеризованого лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А. С. Дуднік //



Молодий вчений. — 2018. — №6. С. 15 -18. (РИНЦ, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus) — Режим доступу: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2018/6/4.pdf>

46. Огляд та реалізація концепції розумного будинку [Електронне видання] — Режим доступу: [https://revolution.allbest.ru/programming/00800425\\_0.html](https://revolution.allbest.ru/programming/00800425_0.html)

47. Інтелектуальна система управління "Розумний дім" [Електронне видання] — Режим доступу: <https://ukrbukva.net/page%2C5%2C81947-Intellektualnaya-sistema-upravleniya-Umnyiy-dom.html>

48. Концепції Розумного будинку [Електронне видання] — Режим доступу: <https://lektsii.org/6-37832.html>

## **РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН**

Безпроводні сенсорні прилади часто використовують в сучасних технічних пристроях різного призначення: від стільникових телефонів до спеціалізованих пристроїв аерокосмічної техніки. При цьому найбільш поширенішими для задач вимірювання лінійно кутових величин є безпроводні сенсорні приладові системи, що входять до складу комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин. Важливим аспектом даної галузі є те, що у багатьох ситуаціях є неможливим використовувати кабель для з'єднання складових компонентів КССВМС. В певних типах місцевості кабель або взагалі не можливо прокласти, або існує велика імовірність, що він досить швидко має змогу пошкодитись. Для подібних задач найоптимальнішим варіантом для з'єднання компонентів системи є радіоефір.

Тому метою четвертого розділу є постановка експериментальних досліджень комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин, що описані в попередніх розділах. Також невід'ємною задачею є дослідження точності комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин, а також аналіз похибок. Розробка моделей та функціональних схем пристроїв БСПС, а також ілюстрація їх зовнішньої будови.

За результатами досліджень, проведених у даному розділі, автором опубліковані роботи [1, 5, 12, 16-30, 36-37, 40-43].

### **5.1. Аналіз похибок мікропроцесорних первинних перетворювачів при вимірюванні відстані**

#### **5.1.1. Аналіз похибок мікропроцесорного первинного перетворювача на основі миттєвих значень частоти сигналу**

Для даного дослідження, з метою реалізації методу, що описаний в підрозділі 3.1.1, було обрано мікропроцесорний ППЧС NM8051/1. Цей пристрій

має невеликі габарити і розміщується в корпусі від будь-якого плоского маркера.

Пристрій дозволяє вимірювати частоту в діапазоні від 1 МГц до 1,3 ГГц (з чутливістю не менше 150 ... 200 мВ). Розміри друкованої плати 82x22 мм.

Технічні характеристики:

- напруга живлення  $U$ , В 5;
- струм живлення  $I$ , мА 10;
- коефіцієнт ділення 1000;
- діапазон виміру частот  $f$ , МГц 1 ... 1300;
- вхідна чуттєвість, В 0,15 ... 0,2.

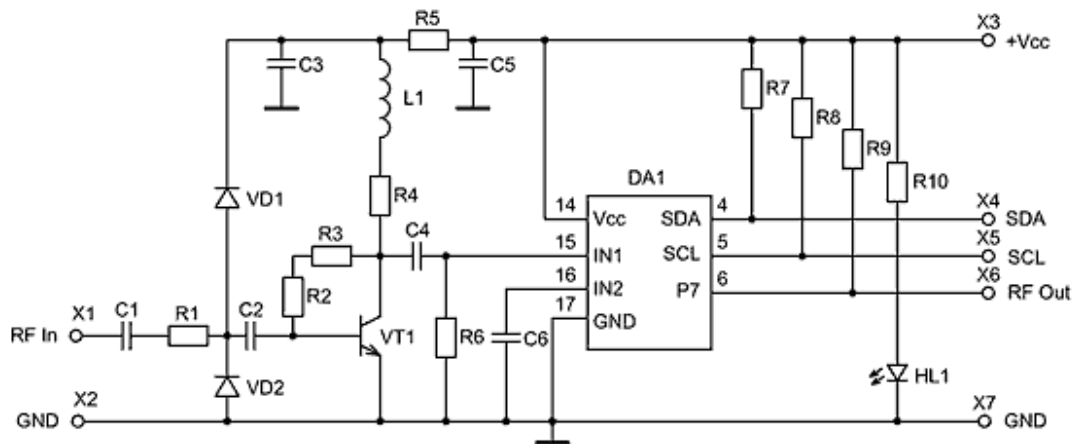


Рисунок 5.1. – Принципова схема мікропроцесорного первинного перетворювача на основі частоти сигналу NM8051/1

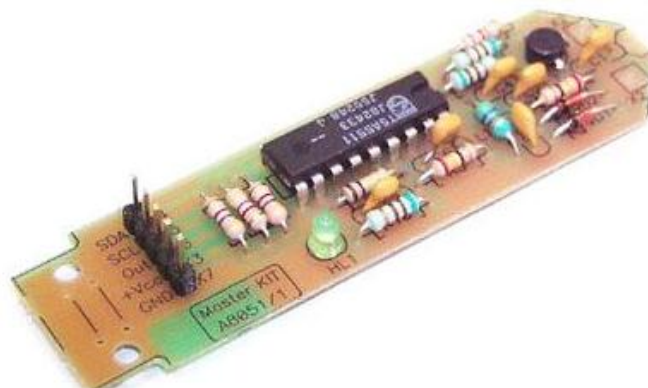


Рисунок 5.2. – Зовнішній вигляд мікропроцесорного первинного перетворювача на основі частоти сигналу NM8051/1

При безпосередньому (прямому) вимірюванні частоти періодичного сигналу суттєвими є такі компоненти похибки, як міра і порівняння [1, 2].

Похибка міри залежить від нестабільності частоти кварцового генеруючого пристрою. Цей компонент похибки має змогу бути відчутним у зв'язку з вимірюванням у досить високих частотних діапазонах [1, 2].

Похибка порівняння найбільше залежить від похибки квантування частоти  $\delta_k$ . При вимірюванні низьких частот похибка квантування є визначальною складовою похибки вимірювання. Як у випадку 3, якщо вимірюється значення частоти  $f_x = 10$  Гц при  $t_0 = 1$  с, то максимальна похибка квантування [1, 2]

$$\delta_{кч} = \frac{100\%}{f_x t_0} = \frac{100\%}{10 \cdot 1} = 10\% ,$$

що неприйнятно.

Як висновок, у зв'язку з великими похибками квантування низькочастотні діапазони безпосередньо вимірюються цифровим ППЧС із невисокою точністю. Тому розв'язання завдання зменшення впливу похибки квантування на результати вимірювання завжди було одним із важливих напрямів розробки цифрової частотовимірювальної техніки [1, 2].

Перед тим як розглядати мікропроцесорний ППЧС, який здатен розв'язати поставлену задачу, розглянемо чотири способи зниження похибки квантування при дослідження частоти [1, 2]:

1. Зростання тривалості зразкового інтервалу часу  $t$ , тобто часу дослідження. Та коло можливостей цього методу обмежені тому, що для одержання малої похибки квантування (як у випадку 3,  $\delta_k = 0,01\%$ ;  $f_x = 10$  Гц) потрібний дуже великий час вимірювання [1, 2]:

$$t_0 = \frac{100\%}{\delta_{кч} f_x} = \frac{100\%}{0,01 \cdot 10} = 1000 \text{ с}.$$

2. Збільшення числа імпульсів, які квантують зразковий часовий інтервал  $t_0$ , що досягається множенням вимірюваної частоти  $f_x$ . Виконання даного способу поєднано із застосуванням додаткового блока помножувача частоти, що

ускладнює і підвищує вартість апаратурної частини [1, 2].

3. Врахування випадкової природи похибки квантування. Гарантується організація багатократних вимірювань і корекція їх показників. Це дієвий метод пониження впливу хаотичної похибки на показники дослідження [1, 2].

4. Пряме дослідження періоду вимірювального сигналу з обов'язковим врахуванням частоти  $f_x = 1/T_x$ . Цей метод дає змогу суттєво знизити похибку квантування у низькочастотних діапазонах [1, 2].

Щоб побачити ефект, який досягається, скористаємось наведеним раніше прикладом. Перейдемо до вимірювання періоду. Значення частоти  $f_x = 10$  Гц. Відповідний період  $T_x = 0.1$  с. Сформуємо стробувальний імпульс тривалістю, що дорівнює періоду  $T_x$ , і проквантуємо його імпульсами, значення частоти проходження яких  $f_0 = 10$  МГц (що звичайно має місце в цифрових ППЧС). У цьому разі похибка квантування [1, 2]

$$\delta_{\kappa\pi} = \frac{100\%}{T_x f_0} = \frac{100\%}{0.1 \cdot 10^7} = 10^{-4}\%$$

Можна зробити висновок, що непряме вимірювання частоти  $f_x = 1/T_x$  у даній ситуації дало змогу суттєво поліпшити точність, у порівнянні з прямим вимірюванням частоти: похибка квантування знизилась у 100000 разів.

Проте, у випадку вимірювання високої частоти (наприклад,  $f_x = 106$  Гц,  $t_0 = 1$  с,  $f_0 = 10$  Гц) похибка квантування цифрового ППЧС [1, 2]

$$\delta_{\kappa\chi} = \frac{100\%}{t_0 f_x} = \frac{100\%}{0.1 \cdot 10^6} = 10^{-4}\% ,$$

а похибка квантування цифрового ППЧС надмірно зростає [1, 2]:

$$\delta_{\kappa\chi} = \frac{100\% f_x}{f_0} = \frac{100\% \cdot 10^6}{10^7} = 10\% .$$

Похибка квантування зображена на рис. 5.3 [1, 2].

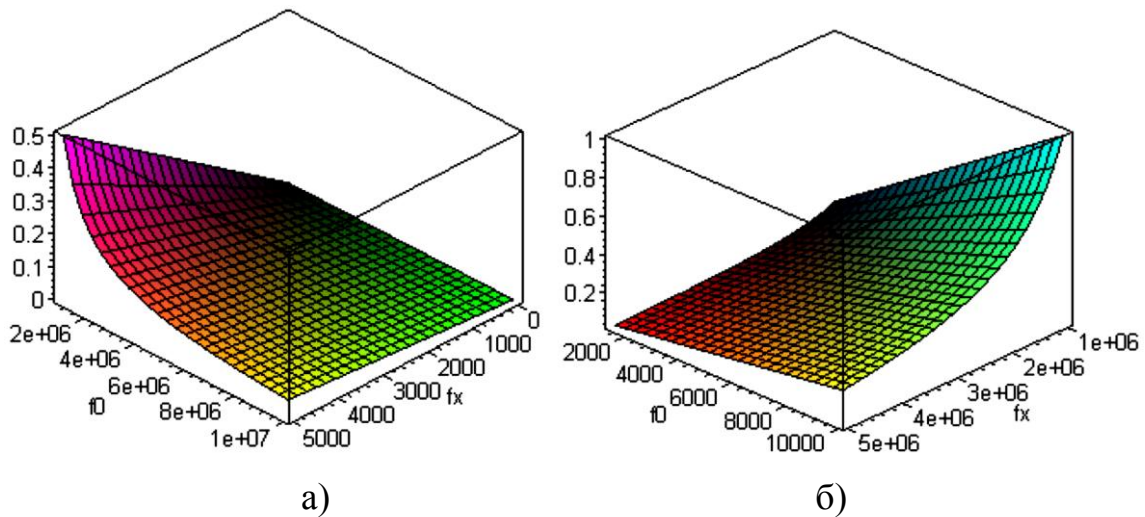


Рисунок 5.3. – Похибка квантування: а) вимірювача періоду; б) вимірювача частоти [1, 2]

Таким чином, при дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот, з метою отримання заданої точності потрібно в високочастотному діапазоні використовувати цифровий ППЧС, а в діапазоні низьких частот переходити до вимірювання періоду [1, 2].

Значення похибки квантування цифрового ППЧС визначається так [1, 2]

$$\delta_{\kappa T} = \frac{1}{N} 100\% = \frac{1}{T_x f_0} 100\% = \frac{f_x}{f_0} 100\%$$

Аналіз рівняння похибки квантування (рис.4.4.) показує, що можливим шляхом зменшення  $\delta_{\kappa T}$  є збільшення частоти квантування  $f_0$  і вимірюваної величини  $T_x$ . [1, 2]

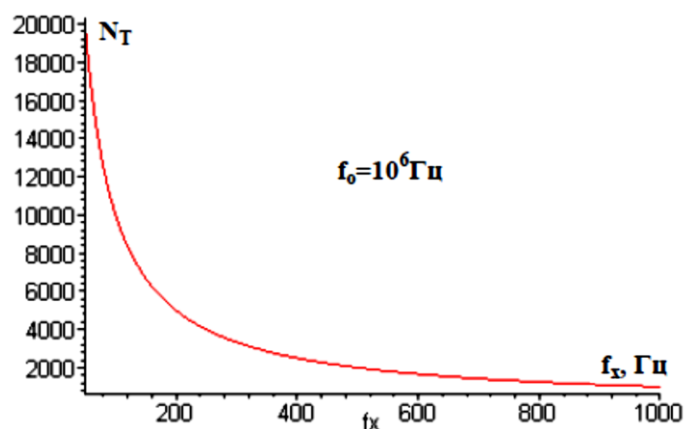


Рисунок 5.4. – Статична характеристика цифрового ППЧС [1, 2]

Зростання показника частоти  $f_0$  обмежене швидкістю роботи складових частин, на якій побудовано ППЧС. У зв'язку з цим, для зниження даної складової похибки для сталих  $T_0$  і  $T_x$  потрібно квантувати невідому частоту у кількох періодах [1, 2].

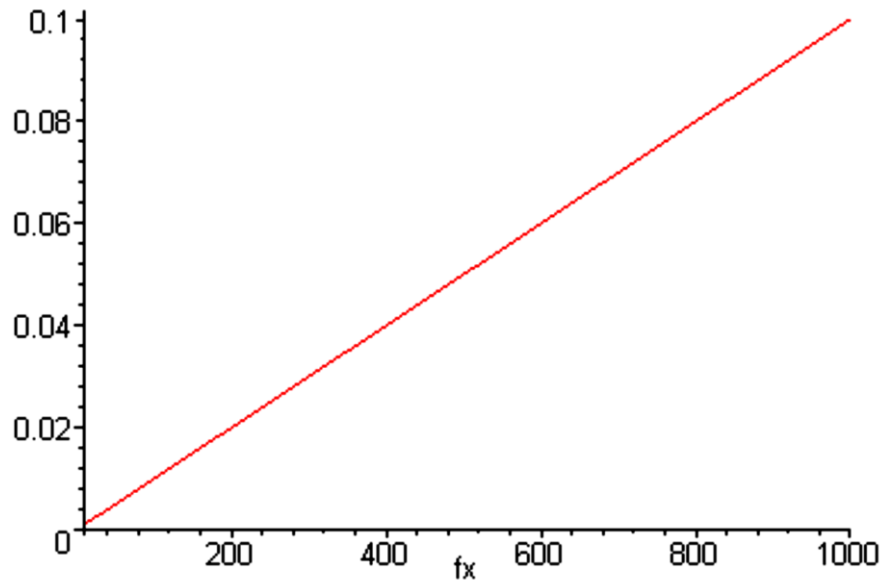


Рисунок 5.5. – Аналіз рівняння похибки квантування [1, 2]

Крім похибки квантування в ППЧС миттєвих значень виникає похибка  $\delta_{змч}$ , що викликана похибкою початкового налаштування частоти генеруючого пристрою G, а також мінливістю її часових і температурних характеристик та похибкою визначення періоду. Доповнивши структуру ППЧС перетворювачем  $N_T/N_f$ , в якому виконується операція  $1/T_x$ , одержують схему цифрового ППЧС, що вимірює миттєві значення. Обчислюється максимальне і мінімальне значення показників. Мінімальне значення вимірювань обмежена максимальною ємністю двійкового лічильника і визначається [1, 2]

$$N_{\max} = \frac{f_0}{f_x} \Rightarrow 2^n = \frac{f_0}{f_{x\min}} \Rightarrow f_{x\min} = \frac{f_0}{2^n}$$

Для визначення верхньої межі вимірювання задамося нормованим значенням похибки квантування  $\delta_k = \delta_{кн}$  і знайдемо  $f_{x\max}$  [1, 2]:

$$\delta_{кн} = \frac{f_{x\max}}{f_0} 100\% \Rightarrow f_{x\max} = \frac{\delta_{кн} f_0}{100\%}$$

Галузь застосування цифрового ППЧС, що вимірює миттєві значення –

дослідження низьких та інфранизьких частот цих діапазонів (до одиниць кілогерц) [1, 2].

#### 5.1.2. Аналіз похибок мікропроцесорного первинного перетворювача на основі середніх значень частоти сигналу

Статична мікропроцесорного первинного перетворювача на основі середніх значень частоти сигналу (рис. 5.6) [1, 2].

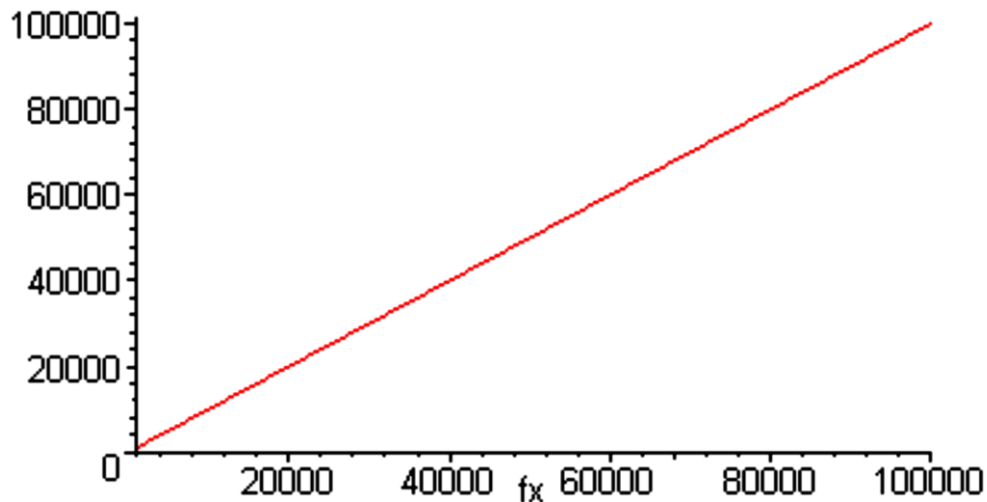


Рисунок 5.6. – Статична характеристика цифрового ППЧС середніх значень

У мікропроцесорному вимірювальному приладі під дією сталої абсолютної похибки в межах коливання величини, яка вимірюється, максимальне значення допустимої основної похибки приводиться до вигляду максимальної зведеної похибки [1, 2]

$$\delta = \frac{\Delta}{X_H} 100\% = \frac{1}{N} 100\%$$

З урахуванням цього, рівняння похибки квантування цифрового ППЧС середніх значень подаємо у вигляді [1, 2]

$$\delta_{kf} = \frac{1}{N_f} 100\% = \frac{f_0}{kf_x} 100\%$$

Дослідження даної формули показало, що похибка квантування у значній мірі залежить від вимірюваної величини (рис.5.7). Вимірюючи низькі частоти, значення похибки буде великим, відштовхуючись від цього можна зробити



висновок, що сфера застосування даних ППЧС – дослідження середніх діапазонів частот ( $>1000$  Гц). Окрім цього, на похибку квантування впливає також величина зразкового часового інтервалу, який визначається коефіцієнтом  $k$  подільника частоти. Похибка квантування зменшується при збільшенні зразкового часового інтервалу  $t_0$ . Однак, збільшення  $t_0$  приводить до зростання часу вимірювання, а, отже, до зниження швидкодії. Оскільки  $\delta_k$  зменшується при збільшенні  $f_x$ , то такі ППЧС ефективні в галузі середніх і високих частот (від одиниць кілогерц до десятків мегагерц) [2, 3, 29].

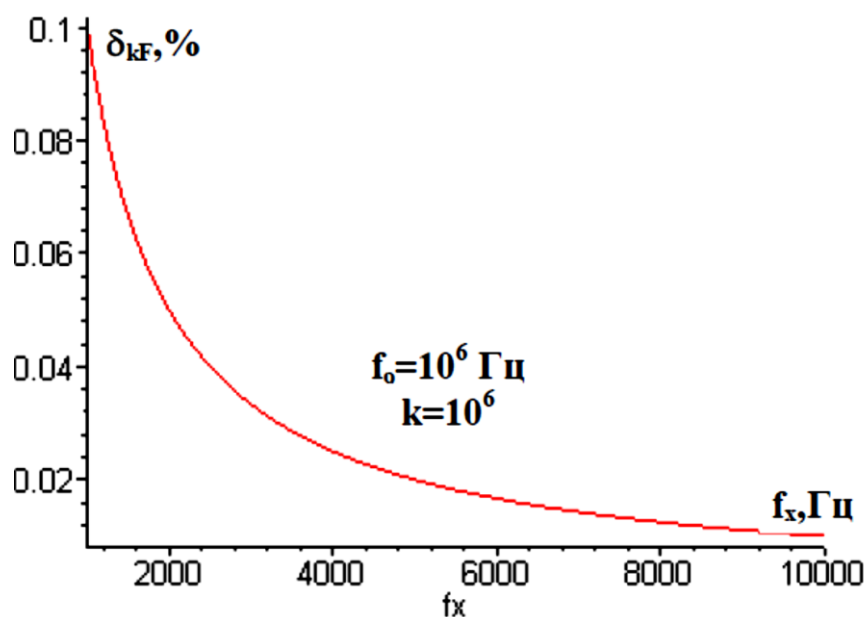


Рисунок 5.7. – Залежність похибки квантування від частоти [2, 3, 29]

Обчислимо мінімальне значення частоти  $f_{x \min}$ . З цією метою введемо нормоване значення похибки квантування  $\delta_k = \delta_{kn}$  [2, 3, 29]:

$$\delta_{kn} = \frac{100\% f_0}{k f_{x \min}} \Rightarrow f_{x \min} = \frac{f_0}{k \delta_{kn}} 100\%$$

Знайдемо верхню межу вимірювання ППЧС середніх значень. Ця характеристика обмежена ємністю двійкового лічильника [2, 3, 29]:

$$N_{\max} = 2n$$

де  $n$  розрядність двійкового лічильника [2, 3, 29].

Підставимо  $N_{\max}$  в рівняння перетворення ППЧС та одержимо формулу обчислення максимального значення частоти [2, 3, 29].

$$f_{x\max} = \frac{2^n f_0}{k} 100\%$$

Цифрові ППЧС даного виду обчислюють параметри часу  $t_0$ , на основі середнього значення частоти  $f_x$ . Тому їх називають ППЧС середніх значень [2, 3, 29].

В галузі низьких і інфранизьких частот більш ефективні ППЧС, які базуються на квантуванні вимірюваного періоду [2, 3, 29].

## 5.2. Аналіз процесу вимірювання відстані засобами комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин та аналіз кінцевого пристрою

У даному дослідженні, будуть використовуватись безпроводні сенсорні модулі XBee серії S2 S2C ZigBee (рис. 5.8), у якості кінцевого пристрою. Відповідно до технічної документації та стандарту [4, 5, 6], вони мають похибки локалізації, що відображені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Залежність похибки локалізації ( $\Delta d$ ) від відстані між сусідніми модулями ( $d$ ) та похибкою визначення часу прибуття сигналу ( $\Delta T_{reply}$ )

$d, м$	$\Delta d$ ( $\Delta T_{reply}$ $= 20 ns$ ), $см$	$\Delta d$ ( $\Delta T_{reply}$ $= 200$ $ns$ ), $см$	$\Delta d$ ( $\Delta T_{reply}$ $= 2\mu s$ , $см$	$\Delta d$ ( $\Delta T_{reply}$ $= 20\mu s$ ), $см$
0,1	$\pm 0.012$	$\pm 0.12$	$\pm 1.2$	$\pm 12$
1	$\pm 0.012$	$\pm 0.12$	$\pm 1.2$	$\pm 12$
10	$\pm 0.05$	$\pm 0.12$	$\pm 1.2$	$\pm 12$
100	$\pm 0.4$	$\pm 0.4$	$\pm 1.2$	$\pm 12$
1000	$\pm 4$	$\pm 4$	$\pm 4$	$\pm 12$
10000	$\pm 40$	$\pm 40$	$\pm 40$	$\pm 40$

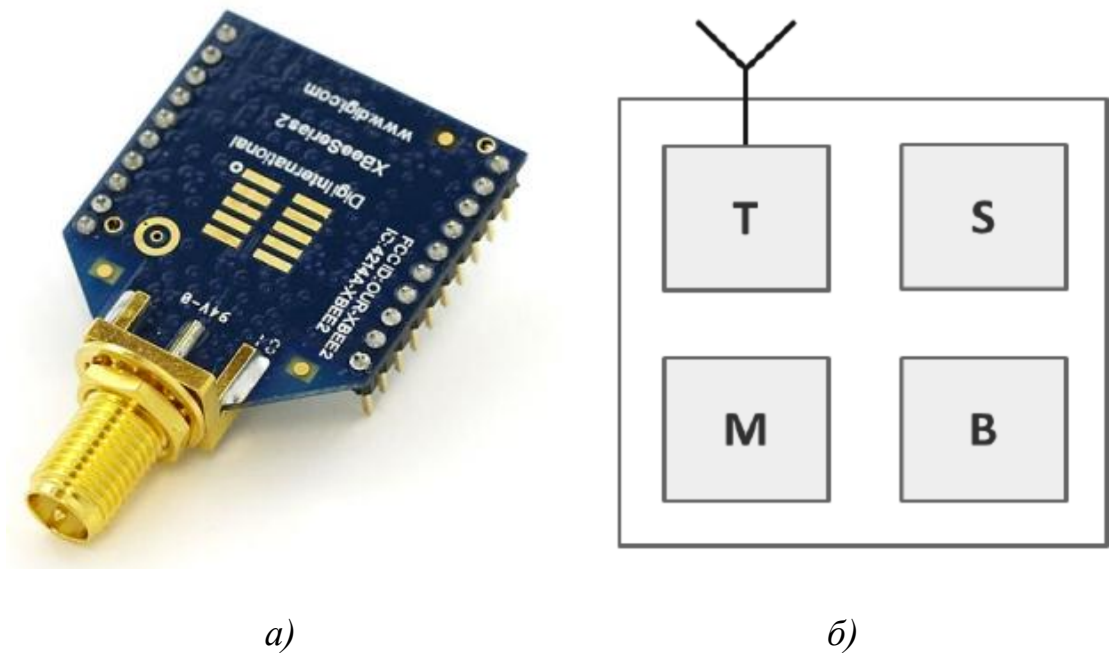


Рисунок 5.8. – Зовнішній вигляд сенсорного модуля (а) та модель (б): Т – Радіочастотний трансивер; М – мікроконтролер; В – джерело живлення; S – сенсор

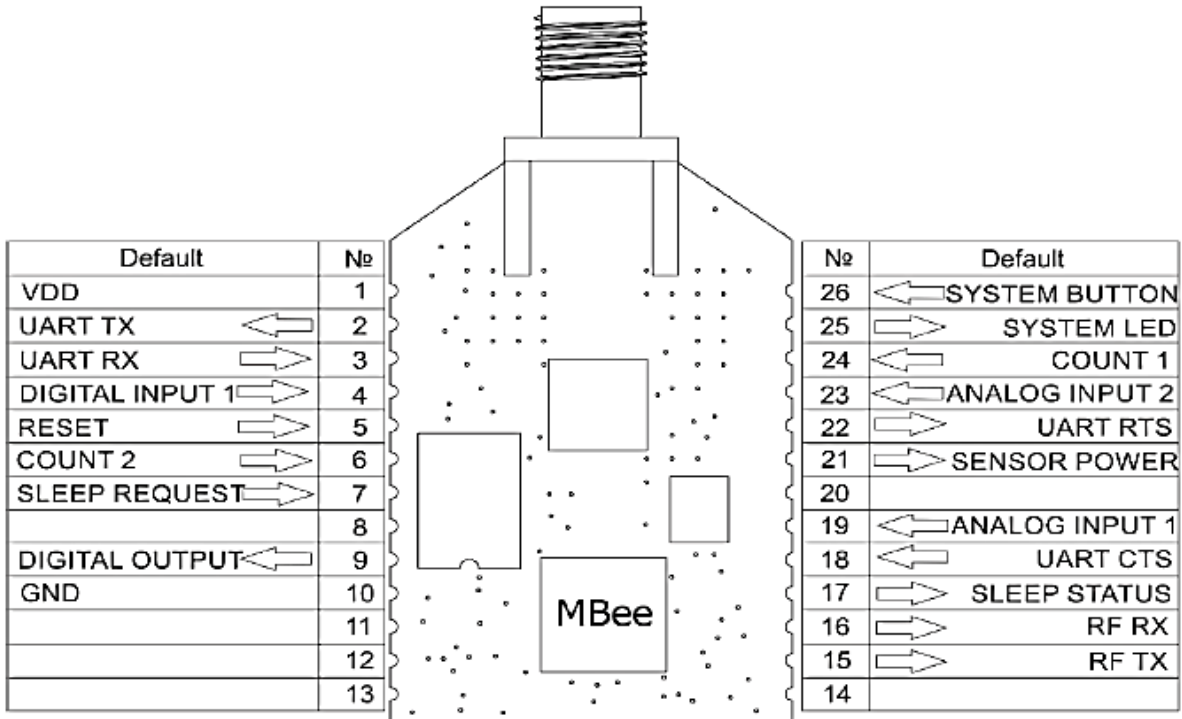


Рисунок 5.9. – Принципова схема сенсорного модуля

**Радіочастотні характеристики:**

- Протокол верхнього рівня ZigBee PRO;

- Робочий діапазон частот 2,405-2,480 ГГц (додаток А);
- Програмована вихідна потужність передавальний пристрою до 21 дБм для модулів МВее-2.4-2.1 і до 4 дБм для модулів МВее-2.4-3.х;
- Чутливість приймаючий пристрою до -103 дБм;
- Швидкість передачі даних до 250 Кбіт / с
- Тип модуляції О-QPSK.

#### **Електричні характеристики:**

- Напруга живлення 2,0 В - 3,6 В;
- Струм в режимі передачі 130 мА;
- Струм в режимі прийому 31 мА;
- Струм в черговому режимі 1,6 мкА;
- Струм в режимі сну не менше 0,4 мкА;
- Максимальна напруга низького рівня на цифрових входах 0,5 В;
- Мінімальна напруга високого рівня на цифрових входах 2,5 В.

Для моделювання процесу визначення позицію об'єктів застосовано метод обмеження квадрату (див. підрозділ 2.2.4) у системі *MATLAB*. Побудовано модель БСПС  $M$  з кількістю вузлових пристроїв  $i=200$  (отримаємо  $M=[1\dots200]$ ). Число опорних вузлових пристроїв (якірних, або концентраторів) складало 10 % ( $B=20$ ). Відстань до кожного сусіднього вузлового пристрою (від  $i$  до  $j$ )  $d_{ij}=35$  м – фіксований радіус передавання ( $d_{ij}$  – виміряна відстань від вузлового пристрою  $i$  до сусіднього вузлового пристрою  $j$ , як це було визначено вище. Фіксований радіус передавання і виміряна відстань від вузлового пристрою  $i$  до сусіднього вузлового пристрою  $j$  це мабуть різні. При моделюванні в системі *MATLAB*, вузлові пристрої на координатній площині розподілялись за рівномірним законом розподілу. Після чого відбувається обчислення відстані від опорних вузлових пристроїв, позиція яких є відомою, до сусідніх, і враховуються їх приблизні координати. Далі, відповідно до структури (рис. 6), ця інформація надходить до сусідніх вузлових пристроїв де враховується для визначення вже їх позиції. При цьому точність локалізації вузлового пристрою залежить від кі-

лькості опорних вузлових пристроїв поряд з ним, а також від його віддаленості від сусідніх вузлових пристроїв. Тому результати локалізації сусіднього з опорним вузловим пристроєм будуть значно точніші, ніж того, шлях до якого від опорного містить кілька проміжних вузлових пристроїв [5].

На рисунку 5.10. зображено локалізовану БСПС, у вигляді впорядкованої структури, а також визначено всі вузлові пристрої в радіусі дії [5].

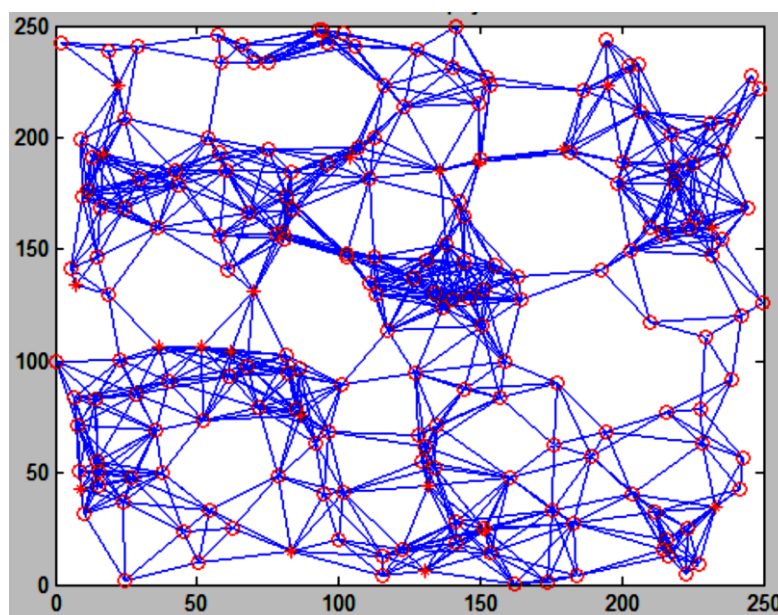


Рисунок 5.10. – Структура БСПС

На рисунку 5.11 зображено розміщення 200 вузлових пристроїв, розташування яких генерується випадковим чином. Знаком схожим на «\*» зображено опорні вузлові пристрої сенсорної БСПС [5].

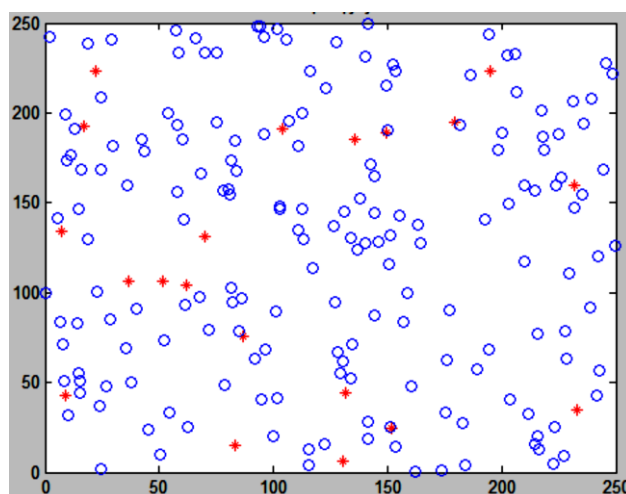


Рисунок 5.11. – Розташування вузлових пристроїв [5]

На рисунку 5.11 різницю у визначенні координат розташування вузлових пристроїв зображено у вигляді відстані між кружечками (розташування вузлових пристроїв після локалізації) та закінченнями ліній (реальне розташування вузлових пристроїв). Це краще видно при співставленні рисунків 4.11 і 4.12. При моделюванні, за допомогою алгоритму на вбудованій мові *MATLAB*, програмується математичний апарат алгоритму обмеження квадрату, що описаний вище. Проходить імітація процесу визначення відстані, на основі часу прибуття сигналу. Час прибуття сигналу моделюється відносно реальної відстані між вузловими пристроями, розташування яких було визначено на основі рівномірного закону розподілу. Також до часу прибуття сигналу, в залежності від відстані між вузловими пристроями, довільним чином вноситься одна з чотирьох похибок ( $\Delta T_{reply}$ ) (табл. 4.1).

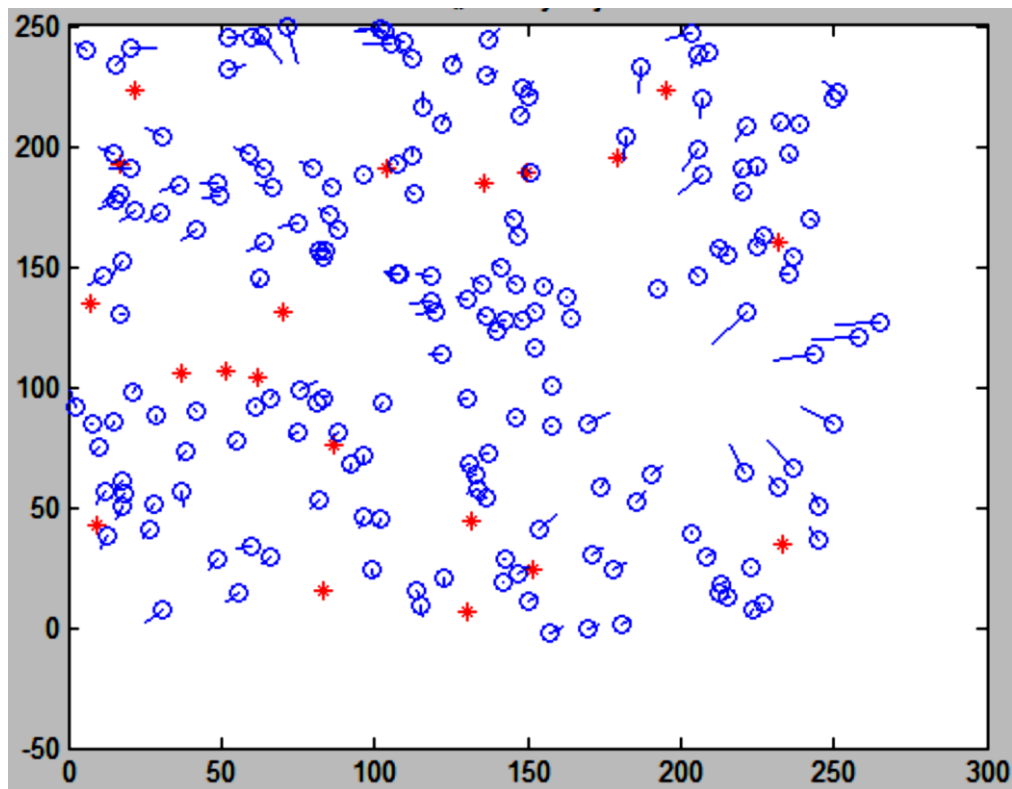


Рисунок 5.12. – Порівняння реальних позицій вузлових пристроїв (позначено лініями) та результатів локалізації (позначено кружечками)

У подальших дослідженнях планується отримати теоретичні оцінки похибок вимірювань різними методами, провести експерименти з цією моделлю,

при збільшенні кількості вузлових пристроїв, а також із застосуванням різних алгоритмів визначення відстані між вузловими пристроями, з метою оцінки похибки локалізації, при застосуванні кожного з них. Також, для взаємоперевірки результатів, буде запропоновано включити до складу комп'ютеризованої системи вимірювання відстані між об'єктами лазерні далекоміри, під'єднавши їх до БСПС.

### **5.3. Дослідження методу підвищення продуктивності кінцевих маршрутних пристроїв**

У даному дослідженні, крім кінцевого пристрою (рис. 5.8) буде використовуватись MB-USBridge, в якості маршрутного пристрою рис. 5.13. Принципова схема даного пристрою міститься в додатку Б.

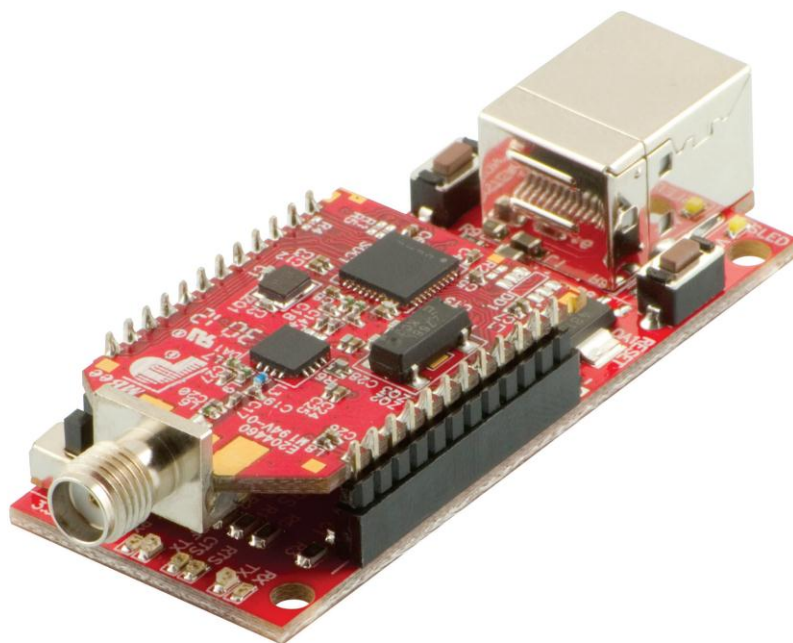


Рисунок 5.13. – Зовнішній вигляд маршрутного пристрою

У результаті дослідження були отримані параметри роботи БСПС, зокрема затримка в чергах каналів передавання сусідніх пристроїв, що відповідає пропускній спроможності каналу передавання у випадку, коли навантаження на даний канал є максимальним [5, 7, 8, 9, 14, 28].

Розглянуто 3 моделі відповідної структури, у яких застосовувались 3 різні алгоритми управління трафіком, що застосовуються у різних стандартах *ZigBee*, а саме «*FIFO*», «*Пріоритетне обслуговування*», «*Зважені черги*». Проведене дослідження з метою порівняльної характеристики між цими алгоритмами за критеріями пропускної спроможності каналів передавання, максимальної швидкості передавання показників, дальності передавання показників, кількості підканалів. Після ряду досліджень з метою порівняння, проведених за правилами процедури підтримки прийняття рішень «*Analitics hierarchy process*» (АНР) по даним алгоритмам було отримано наступні підсумкові коефіцієнти, а саме [5, 14, 28]:

- алгоритм «*FIFO*» – 0,228;
- алгоритм «*пріоритетне обслуговування*» – 0,222;
- алгоритм «*Зважені черги*» – 0,55 [5, 14, 28].

У результаті даних порівнянь досліджено, що алгоритм «*зважені черги*» в двічі кращий, ніж 2 інших. Проведено дослідження, які показали, що результати, отримані при використанні моделі типу  $G/M/n$  для моделювання передачі показників вимірювання сенсорними БСПС, є найбільш точними серед інших моделей [5, 10, 14, 28].

Досліджено модель БСПС на концептуальному рівні. На основі результатів моделювання даної приладової системи при стандартній смузі частот БСПС «*ZigBee*» (2400–2483,5 МГц *ISM*-діапазону), за формулою (1) була одержана характеристика на рис. 5. Стандартну смугу частот було розширено на 80 МГц та за формулою (1) знято характеристику, що на рис. 4.14. У підсумку зроблений висновок, що розширення смуги частот хоч і погіршує на початку швидкісні показники передавання показників вимірювання сенсорною БСПС *ZigBee*, але значно поліпшує інші параметри, зокрема пропускну спроможність [5, 10, 14, 28].

Досліджено одноканальні пристрої. Передавання показників вимірювання, в даному випадку, буде відбуватися від одного вимірювального пристрою до іншого. Залежність пропускної спроможності каналу передавання ( $C$ ) від часу



затримки на обробку в обслуговуючому пристрої каналу, яку зображено на рис. 8, було одержано за формулою (3.8) [5, 11, 12, 14, 28].

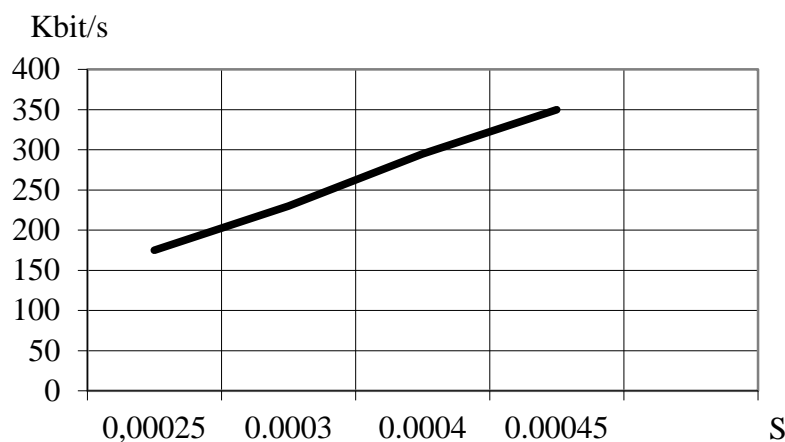


Рисунок 5.14. – Графік залежності пропускної спроможності каналу передавання від часу затримки на обробку в обслуговуючому пристрої каналу [5, 14, 28]

На рис. 5.14 спостерігається лінійне зростання навантаження, що свідчить про стабільну поведінку обслуговуючих пристроїв при моделюванні стаціонарних процесів за допомогою моделей типу  $G/M/1$ . Було проведено експеримент зі стандартним алгоритмом роботи сенсорного пристрою, структуру якого зображено на рис. 3.5, результати якого відображено на рис. 5.15 [5, 14, 28].

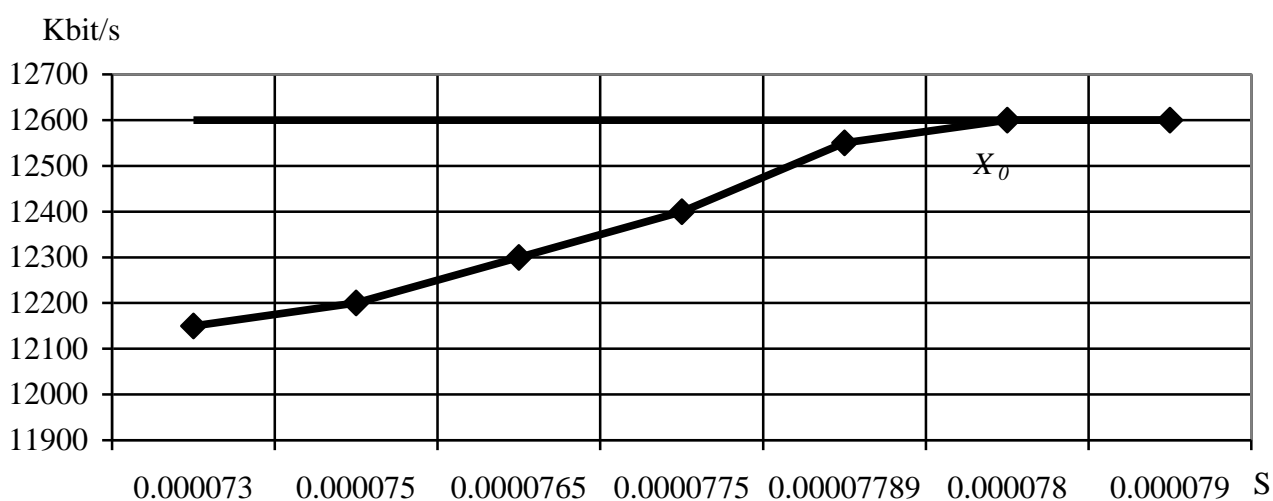


Рисунок 5.15 – Графік залежності часу затримки від навантаження каналу передавання [5, 14, 28]

Точка насичення  $X_0$  визначається за формулою [5, 14, 28]:

$$X_0 = \frac{1}{V_d R_d},$$

де  $X_0$  – найбільше навантаження для даної БСПС;  $V_d$  – коефіцієнт відвідування для вузлового пристрою  $d$ ;  $R_d$  – час перебування бітів у БСПС для вузлового пристрою  $d$  [5, 14, 28].

В каналах передавання даної БСПС перерозподіл потоків буде відбуватися за допомогою алгоритму курування чергами «Зважені черги».

Далі в експеримент було внесено зміни, відповідно алгоритму, що зображено на рис. 3.8, та його опису [5, 14, 28].

На основі даних досліджень, за формулою (4.4) було одержано характеристику, наведену на рис. 4.16 [5, 13, 14, 15, 16, 28].

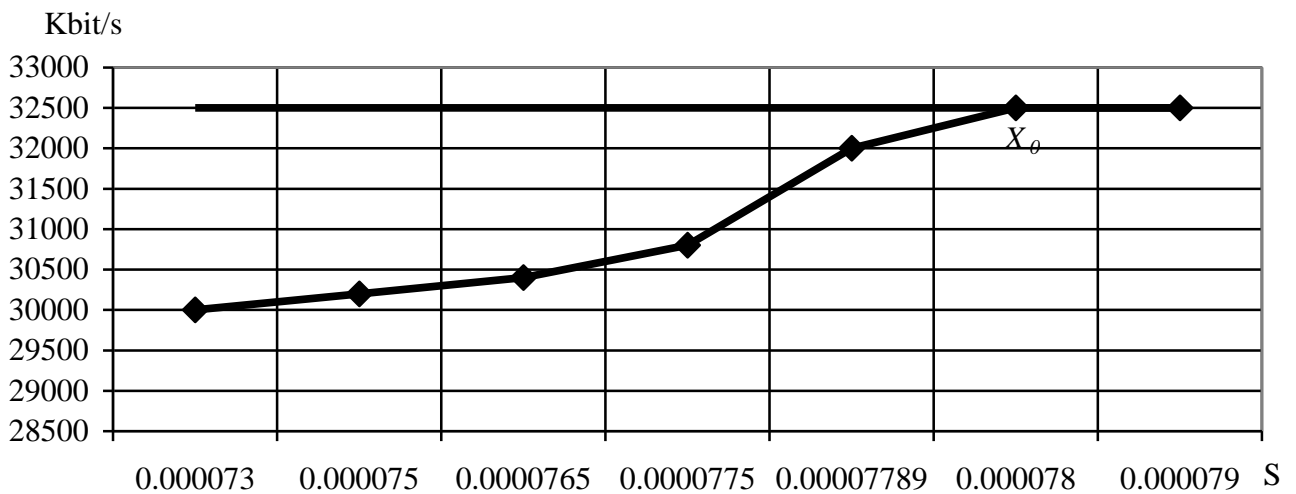


Рисунок 5.16. – Графік залежності часу затримки від навантаження каналу передавання [5, 14, 28]

Як показано на рис. 5.16, даний алгоритм вносить в роботу БСПС досить позитивні зміни. Це видно з того, що при значному зростанні навантаження в каналах передавання час затримки бітів в черзі на обробку майже не змінився. Тобто канал передавання даних пристрою, що працює за цим алгоритмом, витримує навантаження майже в 2,5 рази, ніж при стандартному алгоритмі. Цілком імовірно, що таким покращенням сприяє зменшення відсотку помилкових

пакетів та запитів на їх повторну відправку, що також потребують певного часу для обробки. А також перехід на стандарт з більшою потужністю при падінні рівня сигналу. Це безумовно покращує стійкість роботи БСПС, значно зменшуючи імовірність відсутності сигналу в зонах невпевненого прийому [5, 14, 17, 18, 19, 28].

#### **5.4.Дослідження методу підвищення п точності пристроїв координаторів**

Для даного дослідження, у якості пристрою координатора було обрано сенсорний прилад RFSerialBridge, рис. 5.17.(принципова схема у додатку В).



Рисунок 5.17. – Зовнішній вигляд концентратора БСПС RFSerialBridge

Лінійний характер роботи алгоритму визначення відстані в умовах прямої видимості – розповсюдження, зображений на рис. 5.18. Результати підтверджують поліпшення ефективності ранжування за допомогою усереднення множини вибірок до значення похибки в 0,6 м. Точність методу була постійна у всьому діапазоні тестування розповсюдження (в радіусі 250 м).

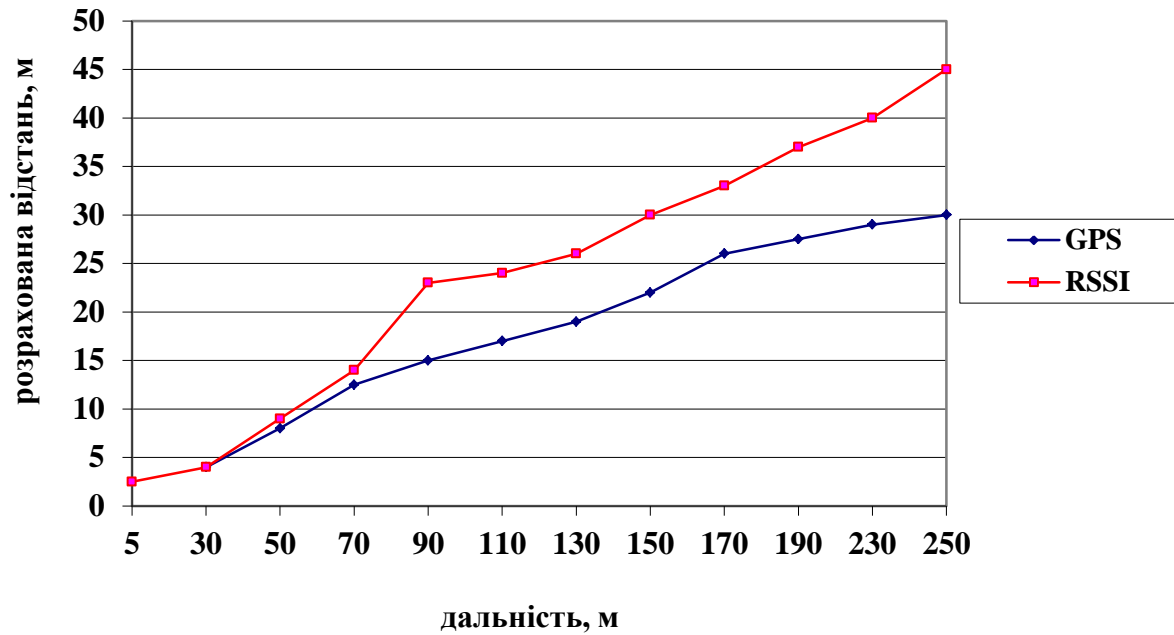


Рисунок 5.1 8— Точність локалізації в умовах поширення сигналу в зоні прямої видимості, для RSSI і GPS [5, 14, 28]

Для моделювання вибрано БСПС з 200–1000 вузлових пристроїв, дана БСПС генерує значення у випадковій позиції на квадратній площині (250 на 250). Кількість якірних вузлових пристроїв складає 10 % від усіх вузлових пристроїв. При фіксованому радіусі дальність передачі для всіх пристроїв в кожній з розглянутих БСПС представлено в табл. 4.2. Тест програми для реалізації процесу моделювання наведено у додатку Г [5, 14, 20, 21, 22, 23, 24, 28].

Таблиця 4.2

Передбачуваний діапазон передачі для різних БСПС

№	Кількість вузлових пристроїв	Радіус дії сенсорного пристрою БСПС
1	200	35
2	500	30
3	1000	20

Результати моделювання за даними табл. 2 для БСПС, які складаються з 200 вузлових пристроїв, такі ж як, і на рис. 5.10 – 5.12 [5, 14, 28, 30].

Якщо звернути увагу на БСПС, яка складається з 200 вузлових пристроїв з точки зору відмовостійкості, то її не можна назвати відмовостійкою. Тому що вихід з ладу чотирьох вузлових пристроїв, які знаходяться у верхній правій частині (рис. 5.19), приведе до від'єднання значного фрагменту БСПС. Щоб завадити цьому, потрібно збільшити радіус дії вузлових пристроїв або збільшити кількість вузлових пристроїв, як показано на рис. 5.19 [5, 14, 25, 26, 30].

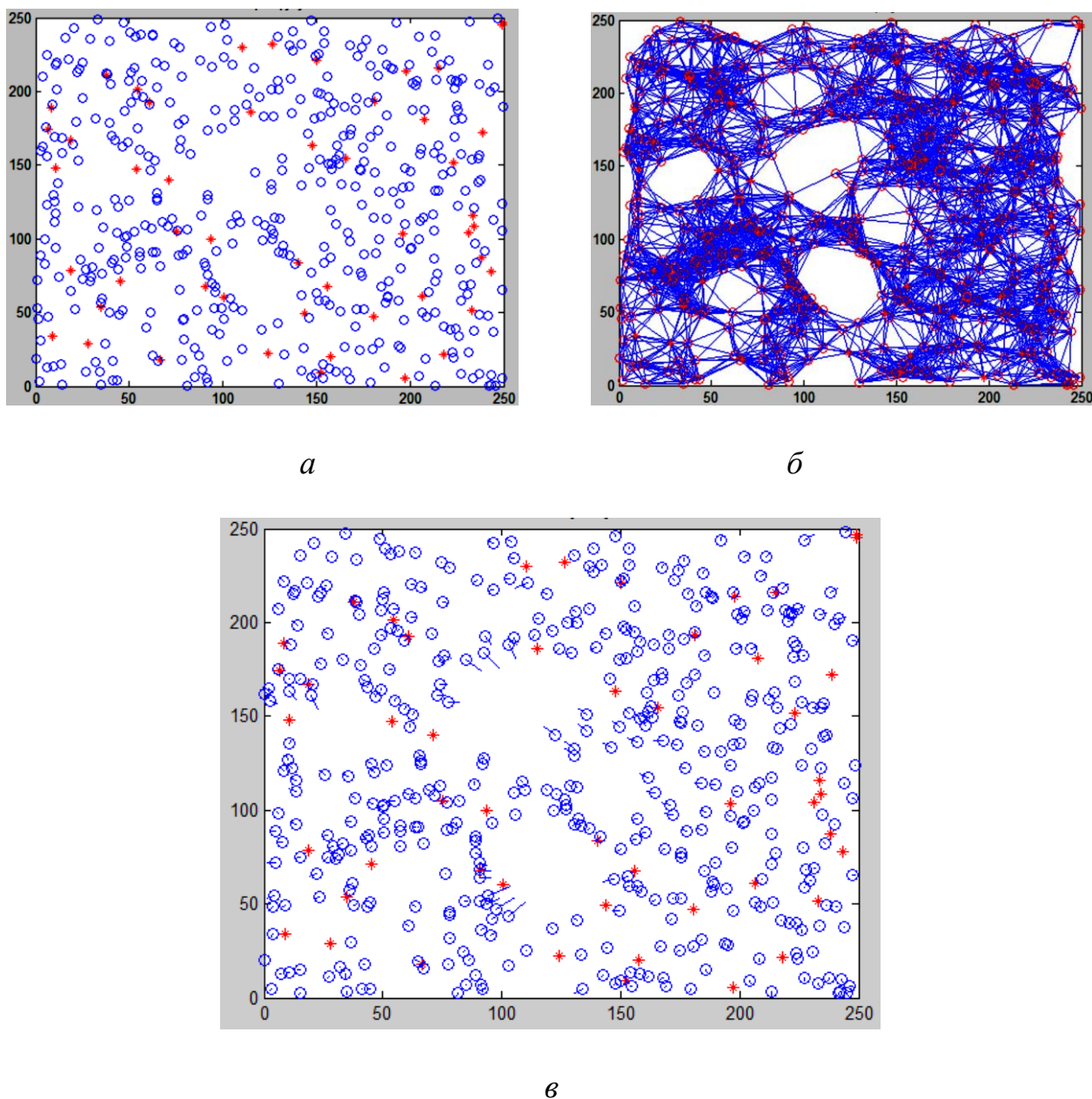


Рисунок 5.19. – Локалізація БСПС з використанням 500 вузлових пристроїв: а – розташування вузлових пристроїв; б – локалізація БСПС; в – оцінка похибки [5, 14, 28, 30]



При цьому похибка  $\delta \approx 0,2$  м, що у 2,5 рази менше, ніж в аналогічних пристроях [5, 14, 28, 30].

В даному дослідженні пропонується розглянути сенсорні мережі, як різновид комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин, на прикладі виявлення об'єктів. Пропонується описати імітаційну постановку даної задачі, а також сформулювати основні визначення елементів системи [5, 14, 28, 30].

Нехай дано площину на якій розміщені вузли (рисунок 5.21). Відомі координати кожного вузлового приладу БСПС в топології, і, звичайно, відомо матрицю відстаней між кожним вузлом. Однак, як моделювання входу, використовується тільки частина матриці відстаней і вибір трьох типових вузлів в якості якірних. Метою локалізації є з'ясувати невідомі координати інших вузлів, крім якорів. Після цього можна оцінити похибку, порівнюючи координати кожного вузлового приладу БСПС та їх вихідні координати [5, 14, 28, 30].

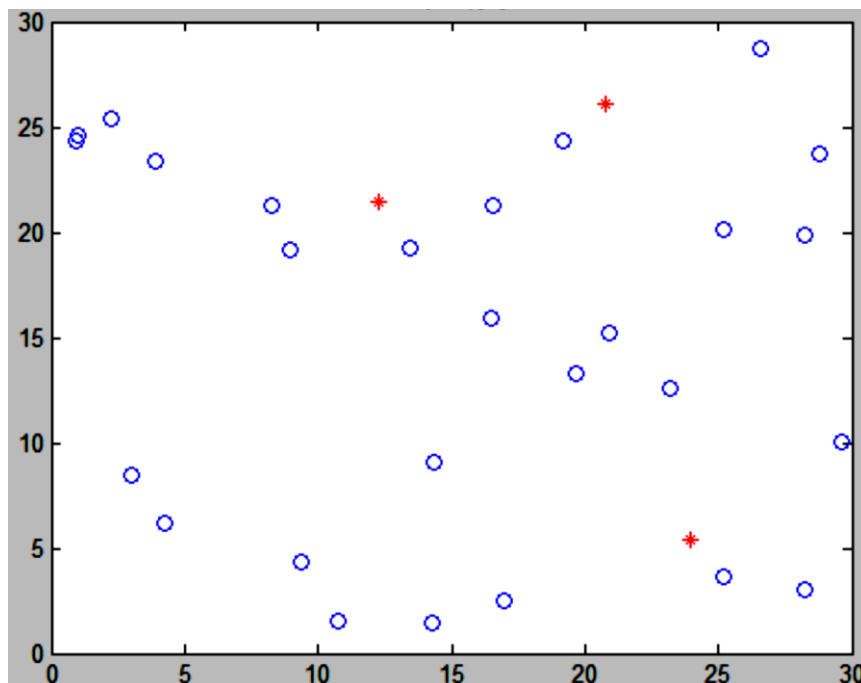


Рисунок 5.21 – розміщення сенсорних вузлів [5, 14, 28, 30]

Моделювання сенсорної мережі в системі MATLAB складається з наступних кроків [5, 14, 28, 30]:



а) Створення типової топології мережі. Визначається кількість вузлів, відстані, і випадковий шум щодо відстані між кожною сіткою, можна запрограмувати для генерації випадкових структур мережі, що означає, що можна отримати масив вузлів з відомими координатами, а також ми відомо повну матрицю відстаней між будь-якими вузловими приладами БСПСми. Щоб моделювати процес локалізації, замість того, щоб використовувати повну матрицю відстані, потрібно зменшити пряму можливість з'єднання в повній матриці відстані. Для моделювання процесу локалізації, замість використання повної матриці відстаней, потрібно скоротити прямі зв'язки в повній матриці відстаней. Наприклад, можна визначити, що, якщо відстань між двома вузловими приладами БСПСми є більшою ніж поріг, відстань недоступна, і відповідний елемент на відстані, матриці -1 [5, 14, 28, 30].

б) Додавання шуму до матриці відстані. Насправді, там існують похибки вимірювання відстані між двома вузловими приладами БСПСми. Можна експериментувати, додаючи зазвичай розподілений шум до матриці відстані.

в) Вказати координати розташування для трьох і більше якорів, інші вузли в мережі будуть намагатися обчислити найкоротшу відстань до цих якорів [5, 14, 28, 30].

г) Визначити відстань від будь-якого вузлового приладу БСПС до якорів, на основі вимірювання потужності сигналу [5, 14, 28, 30].

д) Обчислення координат кожного вузлового приладу БСПС, використовуючи один із методів: трилатерації, мультилатерації, тріангуляції, обмеження квадрату та імовірнісного підходу [5, 14, 28, 30].

е) Оцінка похибки обчислених координат на основі алгоритму.

Для виконання програми необхідно запустити файл із розширенням `m`, «`gun.m`». Даний файл дозволяє налаштувати структуру параметрів моделі для локалізації сенсорної мережі (рисунки 5.22) [5, 14, 28, 30].

Основними параметрами для налаштування моделі є [5, 14, 28, 30]:

- вибір середовища, прямої видимості (створюється середовище без завад) та відсутності прямої видимості (середовище із завадами, в якості завад



вибирається розмір об'єкту через який не поширюється радіо сигнал вузлів) [5, 14, 28, 30];

- розташування вузлів, із заданими координатами (координати вузлів задаються вручну) та випадковим розміщенням (координати вузлів генеруються випадковим чином), приклад розташування вузлів приведено на рисунку 5.22 [5, 14, 28, 30].

- встановлення кількості вузлів (задається кількість вузлів для всієї мережі, кількість якірних вузлів встановлюється певним процентом від всієї кількості вузлів, що дає можливість визначити яку кількість якірних вузлів необхідно для локалізації сенсорної мережі із найменшою помилкою) [5, 14, 28, 30];

- вибір радіуса дії вузлового приладу БСПС [5, 14, 28, 30].

```

1
2 - clear;
3 - clc;
4 - close all;
5 - cd 'Deploy Nodes'
6 %square_random(30,10,0.1);
7 %square_random(1000,300,0.2,30)
8 %C_random([1000,300,300,700],240,0.2);
9 %square_regular(10,10,0.1,0.2);
10 %C_regular([1000,300,300,700],100,0.1,0.2);
11 %refnodecoor=[2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 9];
12 %actualunknownnodecoor=[5 5];
13 - comm_r=15;% radius
14
15 %%refnodecoor=[0 2;1 0;1 4;3 4;3 0;4 2];
16 %%refnodecoor=[0 0;2 0;4 0;3 4;1 4]; %trapecia
17 %%refnodecoor=[0 0;0 4;4 0;4 4;2 2]; %quinconce
18 %%refnodecoor=[0 2;1 0;2 4;4 2;3 0]; %pentagon
19 %%refnodecoor=[0 0;0 4;4 0;4 4]; %squar
20 %%refnodecoor=[0 0;2 4;4 0]; %tringel
21 %%refnodecoor=[0 0;1 1;2 2;3 3;4 4]; %diagonal
22 %%refnodecoor=[0 2;1 2;2 2;3 2;4 2]; %Line
23 %%refnodecoor=[2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 9];
24 %%refnodecoor=[1 5;2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 1;8 9;9 5];
25 - Distribution_Of_WSN;

```

Рисунок 5.22 – Приклад налаштування файла «run.m» [5, 14, 28, 30]

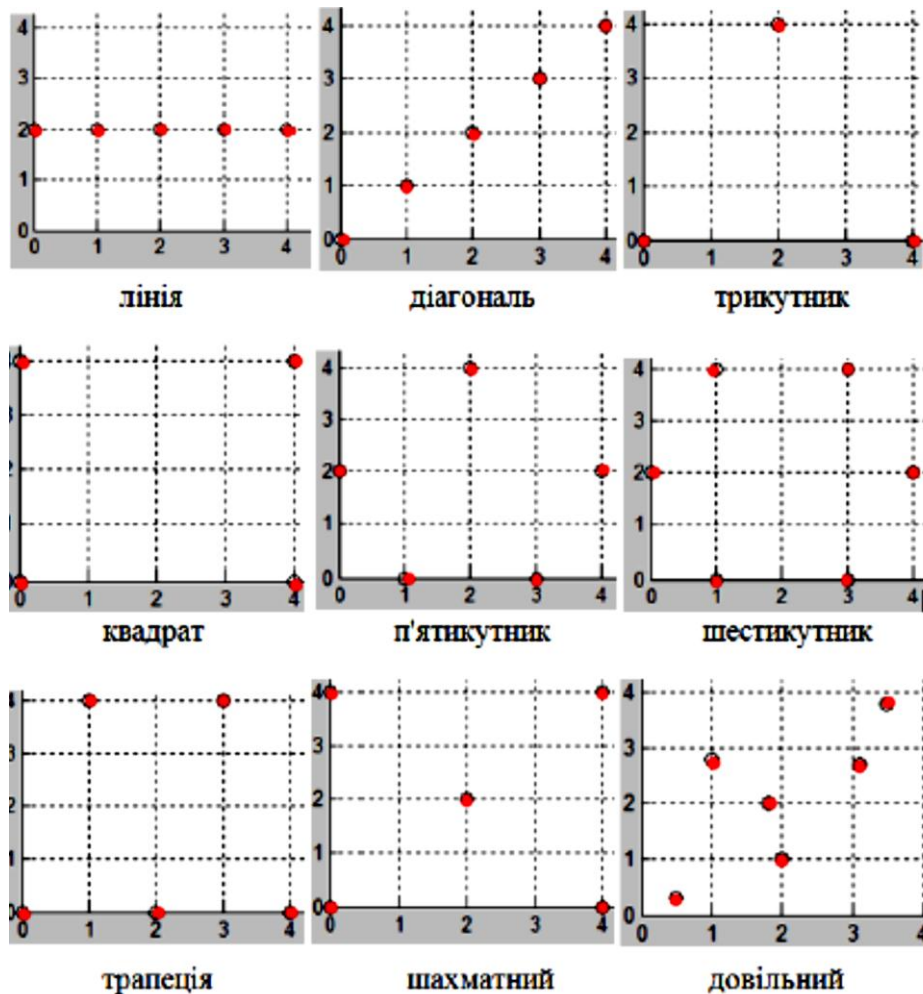


Рисунок 5.23 – Приклад розташування вузлів [5, 14, 28, 30]

Файл «gun.m» викликає функцій та процедури, що знаходяться у зовнішніх файлах – бібліотеках. Серед них [5, 14, 28, 30]:

- Topology\_Of\_WSN – в даному файлі виконується ряд певний ряд операцій: [5, 14, 28, 30]
  - розташування сенсорів на полі координат;
  - визначення координат якірних вузлів;
  - обчислення позицій розташування невідомих вузлів;
  - генерується локалізація мережі та виводиться на екран [5, 14, 28, 30].
- calculate\_localization\_error – даний файл виконує операцію обчислення помилки локалізації мережі (додаток Д). Зчитуючи дані про положення вузлів перед локалізацією і після неї та виводить на екран зображення із розташуванням вузлів після локалізації (кружечки) та початкове

розташування (початок лінії яка з'єднується з кружечком), зірочками позначено розташування якірних вузлів (рисунок 5.24) [5, 14, 28, 30].

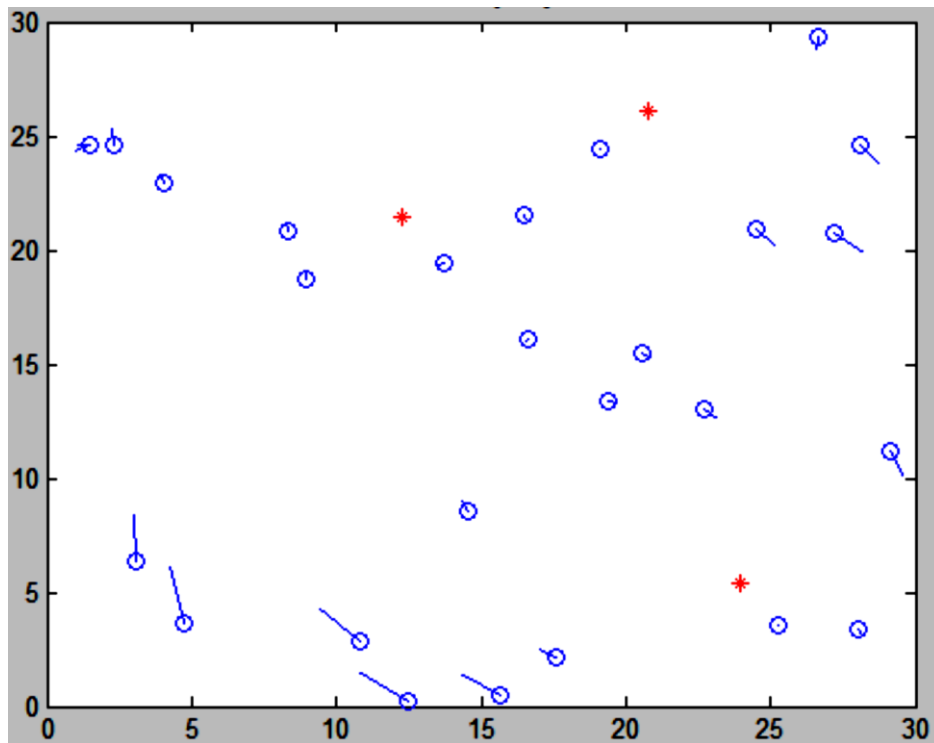


Рисунок 5.24 – Оцінка помилки локалізації сенсорної мережі [5, 14, 28, 30]

Для того щоб оцінити описані підходи до локалізації сенсорної мережі, не обхідно провести багато експериментів в умовах прямої видимості та відсутності прямої видимості. Також необхідно охопити широкий спектр мережевих конфігурацій системи, включаючи розмір мережі (кількість вузлів), число якірних вузлів (розташування), розгортання вузлів якоря, радіо діапазон, похибка вимірювання відстані і часу обчислень [5, 14, 28, 30].

### Висновки до розділу 5

1. Дано оцінку похибці вимірювання частоти, при вимірюванні високих і низьких частот.

2. Визначено, що при дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот, з метою зменшення величини похибки, доречно у високочастотному діапазоні використовувати цифровий ППЧС, а в діапазоні низьких частот переходити до вимірювання періоду [2, 3, 39].

3. Проведено дослідження та побудовано графіки похибок квантування

при вимірюванні частоти та періоду.

4. Побудовано алгоритм роботи мікропроцесорного ППЧС, що дозволяє досліджувати періодичні процеси у широкому діапазоні [2, 3, 39].

5. Запропоновано структурну схему мікропроцесорного ППЧС, яка дозволяє реалізувати наведений алгоритм.

6. Запропоновано рекомендації щодо покращення технічних характеристик БСПС, шляхом додаткового застосування в пристроях БСПС цифрових ППЧС.

7. Проаналізовано принцип роботи цифрового ППЧС, та виявлено, що різницю часу між ультразвуковим та радіосигналом, яка використовується для визначення відстані між об'єктами, можна визначити, за різницею періодів цих сигналів.

8. Побудовано математичну модель роботи цифрового ППЧС.

9. Розроблено структурну схему цифрового , з урахуванням математичної моделі.

10. Проведено аналіз похибки квантування цифрового ППЧС та визначено верхню і нижню межу вимірювань.

11. Дістало подальшого розвитку використання комп'ютеризованих систем вимірювання на основі БСПС, у якості методу вимірювання механічних величин, що покращує процес локалізації об'єктів.

12. Запропоновано математичну постановку задачі визначення координат у сенсорній БСПС, що входить до складу комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин.

13. Виявлено, що адаптований алгоритм «Зважені черги» за критеріями пропускної спроможності каналів передавання, максимальної швидкості передавання показників, дальності передавання показників, кількості підканалів у 2 рази кращий, ніж інші [5, 14, 28].

14. Розроблено математичний апарат для дослідження процесу вимірювання відстані в БСПС у поєднання з блоками лазерного далекоміра. Це дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю, а саме похибка  $\delta \approx 2$  м, що є допустимим для ділянки 250x250 м.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Дуднік А.С. Розробка мікропроцесорного частотоміра для комп'ютеризованих систем вимірювання відстані [Текст] / А.С. Дуднік // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. № 1. – С.162 -167.
2. Дуднік А.С. Метод вимірювання відстані між об'єктами за допомогою цифрового частотоміра миттєвих значень [Текст] / А.С. Дуднік // Метрологія та вимірювальна техніка: XI міжнар. наук.-практ. конф., 9 – 11 жовтня 2018 р.: тези допов. – Харків., 2018. – С. 94.
3. Dudnik A. Method for measuring the distance between objects using a digital frequency measuring device [Текст] / A.Dudnik // European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2018. # 4. P. 19 -24. (**ULRICHSWEB, BASE, EBSCO, eLIBRARY.RU, OpenAIRE, RePEc, ROAR, WorldCat**) (Vienna, Austria)
4. Institute of Electrical and Electronics Engineers / Inc., IEEE Std. 802.15.4- 2003, IEEE Standard for Information Technology — telecommunications and Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements — Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) [Текст]. New York: IEEE Press. – 2003. – P. 250.
5. Дуднік А.С. Розробка методу підвищення продуктивності сенсорних мереж вимірювання відстані [Текст] / А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 3/2 (41). – С.114 -118. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.135486> (**Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE, РИНЦ**) – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/tarp/article/download/135486/143721>
6. Дуднік А.С. Метод застосування протоколу БТР для надійності передачі даних безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко// Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. № 3 (43). – С. 22 – 26. (**РИНЦ, WorldCat, BASE**)
7. Дуднік А.С. Динамічний алгоритм у перерозподілу потоку заявок в

безпроводових комп'ютерних мережах [Текст] /А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2016. – Вип. № 4. – С. 102-104.

8. Дуднік А.С. Система покращеного передавання даних безпроводових комп'ютерних мереж стандарту IEEE 802.11. [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко// Наука і молодь: збірник наукових праць. – К.: НАУ, 2012. – Вип. № 11(12). – С. 113-116.

9. Дуднік А.С. Спосіб підвищення продуктивності безпроводових комп'ютерних мереж на основі міжрівневої взаємодії та пристрій для його реалізації [Текст] / А.С. Дуднік, Є.В. Шевцова, О.О. Зубарева // Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2011. – Вип. № 4 (36). – С. 45 – 50. **(ПИНЦ, WorldCat, BASE)**

10. Dudnik A. Models and methods of growth of productivity of wireless networks in components of computerized systems of measurement of mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Sciences of Europe. – 2018. # 29. Vol. 2. P. 54 -60. **(DIIF, eLIBRARY.RU, GIF, Calameo, ISSUU, Slideshare)** (Praha, Czech Republic)

11. Патент №60400 (Україна), МПК H04B 7/005. Пристрій підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю [Текст] / А. С. Дуднік, Є.В. Шевцова, М.М. Яценко, О.О. Зубарева. – Реєстрац. номер заявки 201007469. Опубліковано в бюлетені №12 від 25.06.2011.

12. Патент №69626 (Україна), МПК H04B 7/005. Безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок [Текст] / А. С. Дуднік, В.П. Якунін. – Реєстрац. номер заявки 201111748. Опубліковано в бюлетені №9 від 10.05.2012.

13. Дуднік А.С. Будова та принцип роботи комп'ютеризованого лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А.С. Дуднік // Теорія і практика сучасної науки: III міжнар. наук.-практ. конф., 29 – 30 червня 2018 р.: тези допов. – Київ., 2018. – С. 100 – 102.

14. Дуднік А.С. Дослідження лазерного віддалеміра з сенсорним

мережевим інтерфейсом [Текст] / А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 4/2 (42). – С.35 -40. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141190> (**Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE, РИНЦ**)

15. Дуднік А.С. Рекомендації щодо застосування «пристрою підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю» та датчиків руху у військових цілях [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Кравченко, В.П. Квасніков // Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні Збройних Сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель: наук.-практ. конф., 30 листопада 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – С. 106 – 108.

16. Dudnik A. Method of devices wireless sensor networks and motion sensors for military purposes [Текст] / A.Dudnik, O. Cholishkina, Yu. Bondarenko // East European Science Journal. – 2018. # 6(34). Vol. 1. P. 37 -41. (**eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI, Slideshare, Cosmos impact factor**) (Warsaw, Poland)

17. Dudnik A. Analysis of technology "internet of things" in the military sphere [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Colloquium-journal. – 2018. # 8(19). Vol. 1. P. 16 -19. (**Index Copernicus, РИНЦ, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (Warsaw, Poland)

18. Дуднік А.С. Аналіз сенсорного мережевого приладу вимірювання відстані між об'єктами [Текст] / А.С. Дуднік, О.Г. Чолишкіна, М.Г. Луцький // Інноваційний розвиток науки нового тисячоліття: III міжнар. наук.-практ. конф., 25 – 26 травня 2018 р.: тези допов. – Чернівці., 2018. – С. 135 – 137.

19. Дуднік А.С. Модель сенсорного комп'ютеризованого приладу вимірювання відстані [Текст] / А.С. Дуднік, В.П. Квасніков // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 1 (81). – С.114 -118. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-114-118](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-114-118) (**Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE**)

20. Кузьмин Л.В., Морозов В.А. Статистические характеристики



ансамбля сверхширокополосных линий связи в условиях многолучевого распространения внутри помещений [Текст], РиЭ, 2009, т. 54, №3, С. 329–338.

21. Кузьмин Л.В., Морозов В.А., Старков С.О., Хаджи Б.А. Анализ помехоустойчивости приема сверхширокополосных хаотических сигналов в условиях многолучевого распространения внутри помещений [Текст], РиЭ, 2006, Т. 51, №11, с. 1360–1367.

22. Jay Martin Mineo Takai and Rajive Bagrodia. Effects of wireless physical layer modeling in mobile "кожен з кожним" networks [Текст]. In Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile "кожен з кожним" networking and computing, pages 87 – 94, 2008.

23. Jim Geier Wireless Networks first-step [Текст] – Indianapolis: Cisco Press: 2005. – 189 pp.

24. Judd, G.; Steenkiste, P., "Design and implementation of an RF front end for physical layer wireless network emulation" [Текст] Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th , vol., no., pp.974-979, 22-25 April 2007

25. Дуднік А. С. Методи підвищення продуктивності пристроїв безпроводних вимірювальних сенсорних мереж [Текст] // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2018. — №12. С. 41 -46. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-12-3993> (РИНЦ, ScholarGoogle, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)

26. Дуднік А.С. Динамічний алгоритм управління перерозподілом мережевого трафіку у безпроводових інформаційних системах [Текст] / А. С. Дуднік // Проблеми модернізації України. – 2015. – Вип. № 1. – С. 126 -129.

27. Квасніков В.П. Визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] / В.П. Квасніков, А.С. Дуднік // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2018. – Вип. № 1(12). С. 54 -60. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2018-1-12-52-58>

28. Dudnik A. Modeling determine the distance between nodes in sensor



networks computerized system for measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik // Spirit time. – 2018. # 8 Vol. 1. P. 14 -18. **(ПИИЦ, ScholarGoogle, Calameo, ISSUU, Slideshare)** (Berlin, Germany)

29. Кухарчук В.В. Метрологія та вимірювальна техніка. Навчальний посібник. [Електронний ресурс] /В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, В.П. Долгополов, Л.В. Грумінська // Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. 252с. – режим доступу:

<http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/2716/000137.pdf?sequence=1>

30. Мандзій В.А. Метод локалізації об'єктів на основі вимірювання потужності сигналу в безпроводних сенсорних мережах: дип...магістра: 8.05010201 "Комп'ютерні системи та мережі" [Електронний ресурс]/ Мандзій Віталій Анатолійович. – Тернопіль, 2012. – 90 с. – Режим доступу:

<http://dspace.tneu.edu.ua/bitstream/316497/1473/1/Mandziy+V.A.%2C+KSMm-51.pdf>

31. Еркин А. Расширение возможностей беспроводных сетей ZigBee:измерение координат узлов [Електронний ресурс] /А. Еркин // КОМПОНЕНТЫ | компоненты семейства 802.xx – Режим доступу:

[https://wireless-e.ru/assets/files/pdf/2011\\_01\\_12.pdf](https://wireless-e.ru/assets/files/pdf/2011_01_12.pdf)

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз приладів та систем, що використовуються у класичних засобах вимірювальної техніки та БСПС для вимірювання відстані, часу проходження сигналу і кута між об'єктами, що може дати змогу порівнювати та коригувати параметри, що одержані методами метрології та комп'ютеризованих технологій.

2. Проведено аналіз методів та алгоритмів локалізації з використанням наступних параметрів систем: оцінка відстані/кута, обчислення позиції та алгоритм локалізації. Запропоновано моделі, методи та рекомендації вимірювання лінійно-кутових величин на основі часу отримання сигналу та падіння його потужності.

3. Запропоновано рівняння для визначення похибки часу отримання сигналу, з урахуванням перешкод, а також визначено основні параметри, що на неї впливають. Побудовано аналітичну модель визначання відстані між сенсорними прийомопередавачами, на основі часу отримання сигналу.

4. Запропоновано структурну схему мікропроцесорного первинного перетворювача на основі частоти сигналу, яка дозволяє реалізувати наведений алгоритм. Запропоновано рекомендації щодо покращення технічних характеристик безпроводних сенсорних приладів, шляхом додаткового застосування в пристроях БСПС цифрових первинних перетворювачів. Визначено, що різницю часу між ультразвуковим та радіосигналом, яка використовується для визначення відстані між об'єктами, можна визначити, за різницею періодів цих сигналів. Побудовано математичну модель роботи цифрового первинного перетворювача та проведено аналіз похибки квантування.

5. Запропоновано метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих приладових вимірювальних систем, що об'єднує нижні рівні еталонної моделі OSI, у поєднанні з розширенням стандартної смуги частот, що покращило швидкість передачі показників вимірювань майже на 200 Кбіт/с. Модернізовано

структурну схему маршрутного пристрою БСПС, функціонально об'єднавши блоки, що відповідають нижнім рівням еталонної моделі OSI. Запропоновано удосконалити принцип роботи маршрутного пристрою БСПС, ввівши в нього алгоритм, що оснований на перерозподілі пропускної спроможності каналу передавання.

6. Запропоновано в зонах невпевненого прийому для відновлення початкової послідовності бітів, з яких формуються пакети показників вимірювання на стороні приймача, застосовувати декодер Витербі на базі фільтру Гауса, що дає можливість приладовій системі аналізувати похибку не тільки поточного показника, але і порівнювати з похибками 6 попередніх показників вимірювання та забезпечує похибку вимірювання в межах  $\Delta=(10^{-2} - 10^{-3})$  м.

7. Розроблено комп'ютеризований лазерний далекомір з сенсорним мережевим інтерфейсом, що поєднує у собі функції лазерного далекоміра, використанням та методів визначення відстані між об'єктами безпроводних сенсорних приладів, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох показників, з метою зменшення похибки  $\Delta T_R \approx 3 \cdot 10^{-9}$  с, а також, враховуючи використання методу Angle of Arrival для визначення кута, буде виконувати функції електронного тахеометра, що на відміну від існуючих, зможе визначати лінійно кутові розміри до об'єктів в зоні непрямої видимості.

8. Проведено експериментальні дослідження процесу вимірювання відстані в БСПС у поєднання з блоками лазерного віддалеміра, що дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю, а саме похибка  $\delta \approx 10^{-2}$  м, що є допустимим для ділянки (250x250) м.

9. Вперше сформульовані нові принципи побудови приладових систем із включенням безпроводних сенсорних пристроїв для вимірювання механічних величин, що базуються на отриманні альтернативних показників вимірювання, завдяки функції локалізації сенсорів у складі комп'ютеризованої приладової системи;

10. Вперше розроблені нові підходи для вирішення проблеми визначення

принципу дії мікропроцесорних первинних вимірювальних перетворювачів, що включені до складу безпроводних сенсорних пристроїв, для створення комп'ютеризованих приладових систем на їх основі та складені рівняння оцінки їх похибок.

11. Вдосконалено модель визначення відстані на основі часу отримання сигналу, що дає змогу оцінювати відстань по передньому фронту імпульсу та оцінити похибку з врахуванням перешкод.

12. Вдосконалено комп'ютеризований лазерний далекомір, до складу якого включено безпроводний сенсорний інтерфейс, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох альтернативних показників.

13. Вперше розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем, з метою підвищення точності при передачі даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах.

14. Дістала подальший розвиток методика локалізації безпроводних сенсорів, що дає змогу оцінити відстань між сенсорами, час проходження сигналу між ними, та кут, що в поєднанні з лазерними далекомірами утворює тахеометричну сенсорну приладову систему.

15. Дістала подальший розвиток методика визначення відстані між об'єктами в умовах відсутності прямої видимості, що відрізняється від існуючих методів далекометрії тим, що світловий промінь, який в них застосовується, не здатний розповсюджуватись по криволінійним траєкторіям.

## Додаток А

**Акт про впровадження на підприємстві ПАТ «НВО «Київський завод автоматики»****ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший заступник  
Голови Правління  
Головний інженер  
ПАТ «НВО «Київський  
завод автоматики»

  
Прук В. Г.  
«\_\_» червня 2018 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ  
результатів дисертаційної роботи**

Ми, що нижче підписалися, головний метролог Малахов В.В., начальник конструкторсько-технологічного управління Возняковський А.О., в.о. начальника СКБ Петренко О.В. склали дійсний акт про те, що результати дисертаційної роботи здобувача Дудніка Андрія Сергійовича впроваджені у практику контролю авіаційної техніки на ПАТ «НВО «Київський завод автоматики».

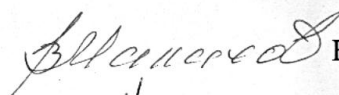
Впроваджено такі результати дисертації:

1. Запропоновано метод локалізації об'єктів на основі падіння потужності сигналу, що дає можливість вимірювання відстані між об'єктами на основі формули Фрісса;
2. Метод підвищення продуктивності сенсорних приладових систем в зонах невпевненого прийому, на основі якого розроблений безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому;
3. Метод вимірювання відстані на основі показників лазерного далекоміра та сенсорного вимірювального приладу, на основі якого розроблений комп'ютеризований лазерний віддалемір з сенсорним мережевим інтерфейсом.

Комісія підтверджує, що результати дисертаційної роботи Дудніка А.С. мають значний науковий внесок в розробку по вимірюванню механічних величин і представляють практичний інтерес для фахівців ПАТ «Київський завод автоматики».

Взаємних фінансових претензій організації не мають.

Головний метролог



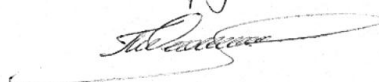
В.В. Малахов

Начальник КТУ



А.О. Возняковський

Начальник СКБ



О.В. Петренко

## Додаток Б

# Акт про впровадження у навчальний процес національного авіаційного університету

ПОГОДЖЕНО

Проректор з навчальної роботи НАУ

А. Гудманян  
«\_»\_ 2018 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор НАУ

В. Ісаєнко  
«\_»\_ 2018 р.

## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Комісія у складі: голова комісії – завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних систем д.т.н., доцент Орнатський Д.П. та членів комісії: доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій к.т.н., доцент Курілов В.І., доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій к.т.н., доцент Осмоловський О.І. констатує, що результати дисертаційної роботи здобувача кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету Дудніка Андрія Сергійовича впроваджені у навчальний процес Національного авіаційного університету на кафедрах інформаційно – вимірювальних систем та комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, а саме:

Найменування впровадженого результату НДР (прилад, технологічний процес, речовина, метод, методика, рекомендації, алгоритми, програми, ДСТ, технологічні вимоги, інше)	Досягнутий фактичний ефект (соціальний, технічний, організаційний, інший)
1. Метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем	1. Запропоновано структурну схему пристрою підвищення продуктивності безпроводних сенсорних приладових систем.
2. Математична модель вимірювання відстані в безпроводних сенсорних приладових системах	2. Розроблена математична модель вимірювання відстані між вузлами комп'ютеризованої сенсорної системи вимірювання механічних величин
3. Метод вимірювання відстані з використанням показників вимірювання лазерного далекоміра та безпроводного сенсора	3. Розроблено структурну схему лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом



Результати дисертаційної роботи Дудніка А.С. за темою «Наукові основи комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин» впроваджені у навчальний процес кафедри інформаційно вимірювальних систем та комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій:

- використовуються у курсах лекцій з дисципліни «Фізичні основи сучасної метрології» з галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».
- застосовується в процесі дипломного та курсового проектування зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

Голова комісії



Д.П. Орнатський

Члени комісії



В.І. Курілов



О.І. Осмоловський



# Патент України на корисну модель "Пристрій підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю"



УКРАЇНА

(19) UA (11) 60400 (13) U  
(51) МПК  
H04B 7/005 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) ПРИСТРІЙ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ В БЕЗДРОВОТИХ МЕРЕЖАХ В ЗОНАХ НЕВПЕВНЕНОГО ПРИЙОМУ АБО З НЕДОСТАТНЬОЮ ЗАВАДОСТІЙКІСТЮ

1

2

(21) u201007469

(22) 15.06.2010

(24) 25.06.2011

(46) 25.06.2011, Бюл.№ 12, 2011 р.

(72) ДУДНІК АНДРІЙ СЕРГІЙОВИЧ, ШЕВЦОВА ЄВГЕНІЯ ВАЛЕРІЙВНА, ЯЦЕНКО МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ, ЗУБАРЕВА ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(57) Пристрій підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого

прийому або з недостатньою завадостійкістю, що містить контролер, що генерує повідомлення, в якому вказується інформація про якість сигналу, здійснюючи зворотний зв'язок, який відрізняється тим, що містить основний блок - аналізатор сигналу, який, використовуючи дані блока інтерфейсу фізичного рівня OSI, дозволяє керуючому пристрою, розташованому на мережевому рівні OSI, приймати рішення про зміну умов передавання даних за необхідністю.

Корисна модель належить до галузі бездротового зв'язку і може бути використана у пристроях для бездротового передавання даних.

Пристрій [1] забезпечує адаптивне кодування інформації у режимі реального часу в бездротовій системі зв'язку з пакетною комутацією. Використовується для надання мультимедійних послуг. Цей пристрій здійснює лише якість за рахунок адаптивного кодування пакетів інформації, але не забезпечує якості їхнього передавання при недостатній завадостійкості мережі.

Відомий пристрій для реконфігурації у бездротовій системі [2] використовується для удосконалення підтримки працездатності сигнального з'єднання між об'єктами.

Даний пристрій не може здійснювати реконфігурацію радіоканалу без відповідного на це повідомлення.

З відомих пристроїв бездротового передавання даних найбільш близьким за технічною суттю до корисної моделі є пристрій [3], який використовується для забезпечення зворотного зв'язку з визначенням якості каналу у бездротовій мережі передавання на декількох несучих частотах.

Цей передавач містить контролер, що генерує повідомлення, в якому вказується інформація про якість сигналу, здійснюючи зворотний зв'язок.

Під час роботи цього пристрою забезпечується, лише передавання повідомлення про якість каналу, але не здійснюється прийняття рішення, щодо покращення якості передавання даних.

Задачею корисної моделі є збір інформації про стан передавання даних в бездротових мережах та прийняття мір щодо покращення даного процесу. Це здійснюється шляхом комплексного застосування аналізу якості сигналу, моніторингу трафіку, аутентифікації даних та реконфігурації параметрів мережі.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю, який містить контролер, що генерує повідомлення, в якому вказується інформація про якість сигналу, здійснюючи зворотний зв'язок, згідно з корисною моделлю введено аналізатор сигналу, який включений між інтерфейсом фізичного рівня та керуючим пристроєм та дозволяє приймати рішення про зміну умов передавання даних за необхідністю.

Введення в пристрій аналізатора сигналу вигідно відрізняє запропонований пристрій підвищення якості передавання даних в бездротових мережах від прототипу, оскільки в прототипі відбувається лише знаходження оптимального частотного діапазону, та передавання відповідного повідомлення між абонентами. В запропонованому ж пристрої крім знаходження оптимальних рішень для подальшого передавання даних, також відбувається пере наладштування пристрою, згідно прийнятих рішень.

На кресленні (Фіг.1) зображена структурна блок-схема пристрою підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах нев-

UA (19) 60400 (13) U

певненого прийому або з недостатньою завадостійкістю.

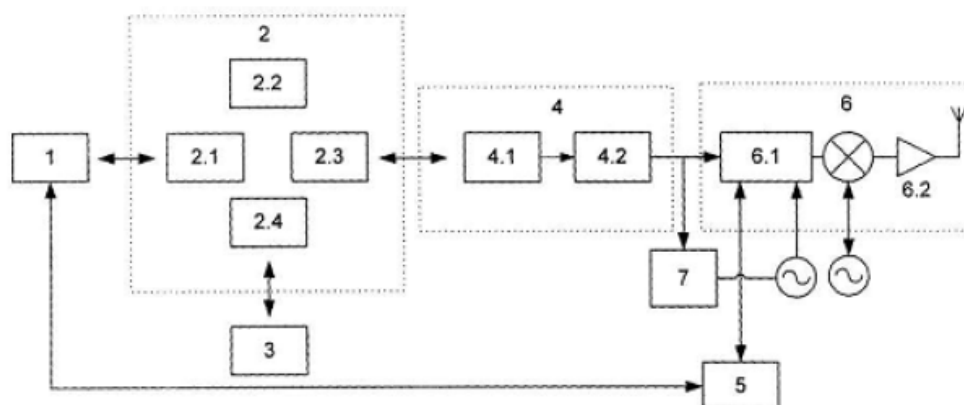
Пристрій підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю містить керуючий блок 1, модуль підрівня LLC канального рівня моделі OSI 2, блоку хост інтерфейсу 2.1, вбудованого мікроконтролера 2.2, блоку додатку прийомо/передавача 2.3, блоку шинного інтерфейсу 2.4, пам'яті 3, модулю підрівня MAC канального рівня OSI 4, контролера смуги частот 4.1, радіочастотного прийомо/передавача 4.2, аналізатора сигналу 5, модуля фізичного рівня OSI 6, інтерфейсу фізичного рівня 6.1, антени 6.2, блоку автоматичного налаштування частоти 7.

Керуючий блок 1, надсилає команду про відправку пакета та сам пакет на модуль підрівня LLC канального рівня моделі OSI 2. В даному модулі через блок хост інтерфейсу 2.1, пройшовши відповідні перетворення, за допомогою додатків даного модуля, пакет стає фреймом. Після чого вбудований мікроконтролер 2.2 передає фрейм до блоку додатку прийомо/передавача 2.3 та через блок шинного інтерфейсу 2.4 записує дані про стан передавання до пам'яті 3, де вони ще певний час зберігаються. Блок додатку прийомо/передавача 2.3 спрямовує фрейм до модуля підрівня MAC канального рівня OSI 4. В даному модулі контролер смуги частот 4.1 підбирає для даного фрейму оп-

тимальний діапазон частот, та спрямовує фрейм до радіочастотного прийомо/передавача 4.2. В даному модулі відбувається як перетворення фрейму у електромагнітні коливання та їх модуляція відповідно до вмісту фрейму. Після цього коливання передаються до модулю фізичного рівня OSI 6, а інформація про підібраний блоком 4.1 діапазон частот передається до блоку автоматичного налаштування частоти 7. Блок 6.1 накладає електромагнітні коливання на частоту, яка налаштовується блоком 7. Коливання спрямовуються до антени 6.2, яка передає сигнал до радіоефіру. Аналізатор сигналу 5 постійно відстежує інформацію про стан передавання даних. Він відсилає відповідні запити до інтерфейсу фізичного рівня 6.1 та отримує від нього інформацію про стан передавання даних. Інформацію про стан передавання даних аналізатор сигналу 5 передає до керуючого пристрою 1, після чого відбувається прийняття рішення про зміну умов передавання даних за необхідністю.

Джерела інформації:

1. Патент РФ №2384008, МПК H04N 7/24, H04L 1/12, 2010.
2. Патент РФ №2384976, МПК H04W 28/18, 2010.
3. Патент РФ №2363104, МПК H04B 7/26, 2009.



Фіг. 1

## Додаток Г

# Патент України на корисну модель "Безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок"



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 69626

(13) U

(51) МПК

H04B 7/005 (2006.01)

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2011 11748	(72) Винахідник(и):	Дуднік Андрій Сергійович (UA), Якунін Валерій Павлович (UA)
(22) Дата подання заявки:	05.10.2011	(73) Власник(и):	НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Комарова, 1, м.Київ, 03680 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	10.05.2012		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	10.05.2012, Бюл.№ 9		

## (54) БЕЗПРОВОДОВИЙ МАРШРУТИЗАТОР З ДИНАМІЧНИМ ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ПОТОКУ ЗАЯВОК

### (57) Реферат:

Безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок містить обслуговуючий пристрій (планувальник), черги обслуговуючого пристрою та класифікуючий блок. В ньому додатково введено другий класифікатор.

UA 69626 U

UA 69626 U

Корисна модель належить до галузі безпроводового зв'язку і може бути використана у пристроях для безпроводового передавання даних.

Пристрій [1] створює декілька віртуальних інтерфейсів, кожному з яких присвоюється інтерфейсний індекс бази керуючої інформації, причому кожен віртуальний інтерфейс відповідає принаймні одному фізичному інтерфейсу та одній точці доступу.

Даний пристрій може лише вказувати до якої безпроводової точки доступу слід приєднатися при погіршенні умов проходження заявок на тій, що приймає участь у передаванні в даний момент.

З відомих пристроїв безпроводового передавання даних найбільш близьким за технічною суттю до корисної моделі є пристрій [2], який використовується для динамічної конфігурації параметрів точки доступу для додатків.

Цей пристрій містить термінал, що контролює всі точки доступу, які він обслуговує.

Під час роботи цього пристрою забезпечується лише реконфігурація з'єднань між абонентами та точками доступу мережі. Даний пристрій не покращує умови передавання в кожній окремій точці доступу для того чи іншого класу заявок.

Задачею корисної моделі є поліпшення умов проходження заявок через обслуговуючі пристрої безпроводових маршрутизаторів шляхом адаптованого перерозподілу потоків.

Поставлена задача вирішується тим, що в безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок, який містить класифікуючий блок, що розподіляє потоки згідно з пріоритетом, здійснюючи проходження заявок по декількох чергах, згідно з винаходом, введено подвійний класифікатор, який здійснює розподіл заявок за двома класами.

Введення в пристрій подвійного класифікатора вигідно відрізняє запропонований безпроводовий маршрутизатор від прототипу, оскільки в прототипі відбувається лише знаходження оптимальної точки доступу та передавання абонентів на неї. В запропонованому ж пристрої здійснюється оптимальне перенаштування параметрів самого маршрутизатора (точки доступу) без переходу на інший.

На кресленні зображена структурна блок-схема безпроводового маршрутизатора з динамічним перерозподілом потоку заявок.

Безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок містить двоступеневий класифікуючий блок 1, який містить класифікатор згідно з пріоритетом користувача 1.1-1.4 та класифікатор згідно з пріоритетом трафіку 1.5-1.8, черги обслуговуючого пристрою 2.1-2.4 та обслуговуючий пристрій (планувальник) 3.

Двоступеневий класифікуючий блок 1, який містить класифікатор згідно з пріоритетом користувача 1.1-1.4 та класифікатор згідно з пріоритетом трафіку 1.5-1.8, здійснює розподіл потоку заявок згідно з умовою:  $C(\%) = (P_k + P_r) / 2 \times 10$ , де  $C$  - пропускна спроможність у відсотках,  $P_k$  - пріоритет робочої станції,  $P_r$  - пріоритет обчислювального потоку (дана умова справедлива лише в тих випадках, коли сума пріоритету користувача та трафіку не перевищує 10).

Далі заявки розподіляються згідно з тієї чи іншої черги обслуговуючого пристрою 2.1-2.4 та надходять до обслуговуючого пристрою (планувальника) 4.

Джерела інформації:

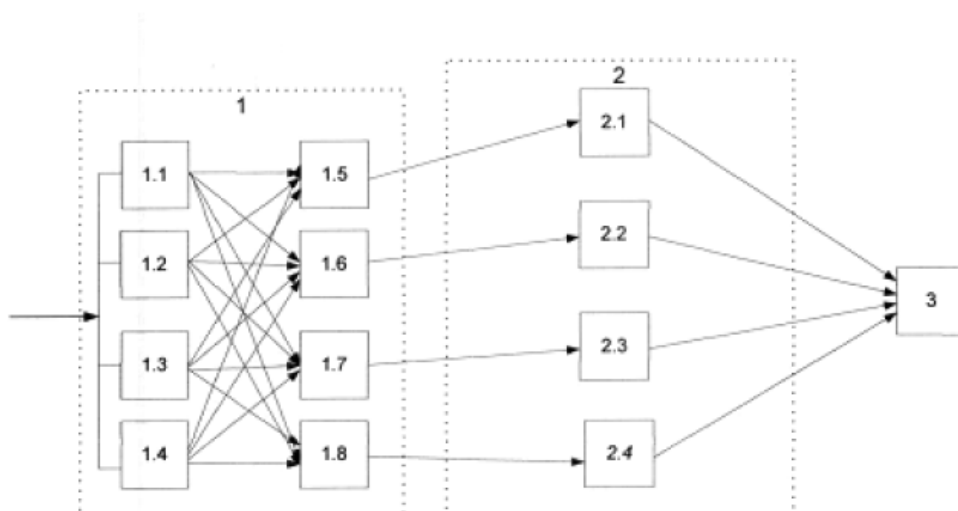
1. Патент РФ № 2008152224, МПК H04W4/00, 2009.

2. Патент РФ № 2009102016, МПК H04L12/56, 2006.

#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок, що містить обслуговуючий пристрій (планувальник), черги обслуговуючого пристрою та класифікуючий блок, який **відрізняється** тим, що в ньому додатково введено другий класифікатор.

UA 69626 U



---

Комп'ютерна верстка Л.Литвиненко

---

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

## Додаток Д

## Нумерація каналів БСПС в не ліцензованому діапазоні [30]

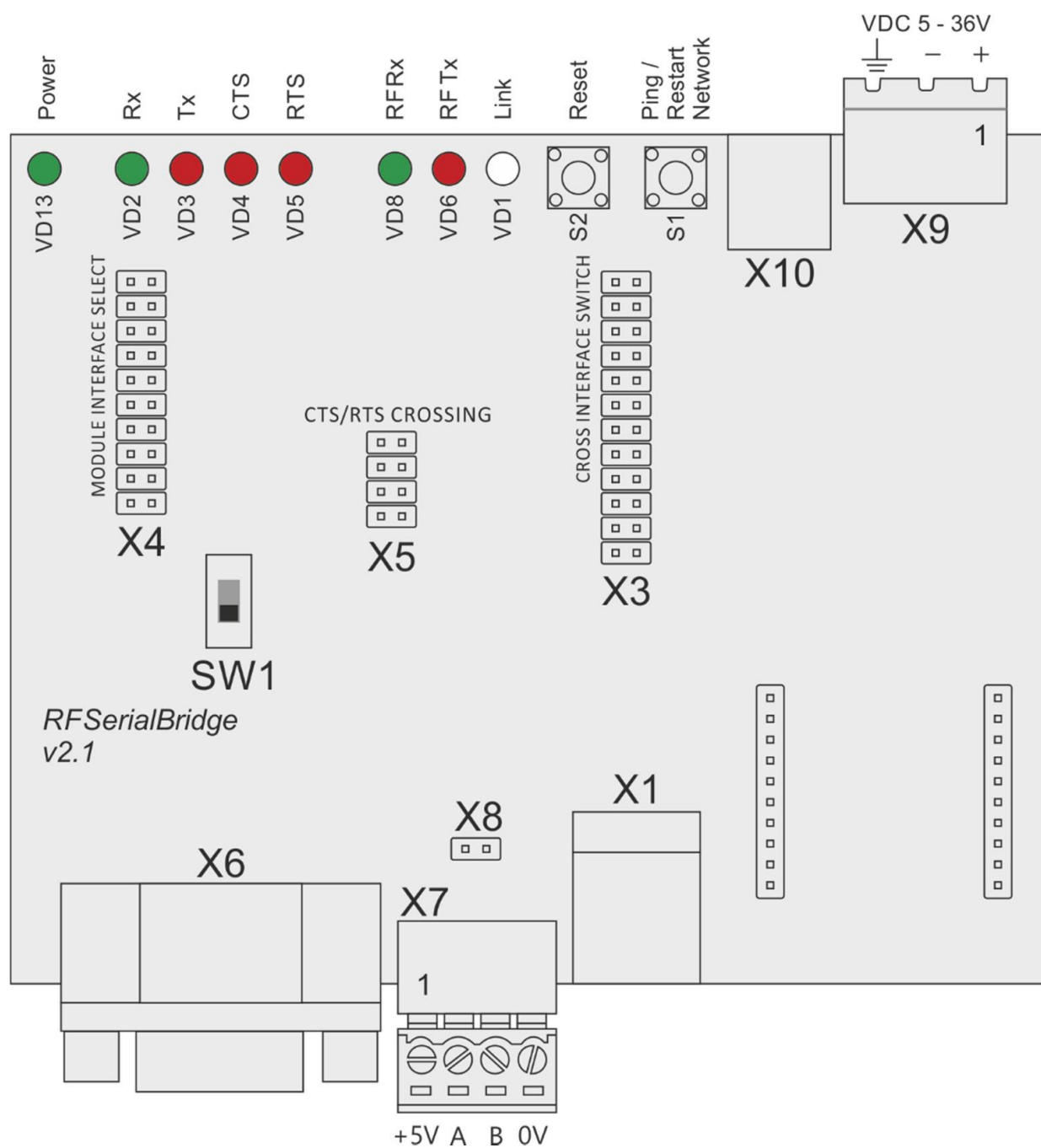
Діапазон частот	Номер каналу	Центральна значення частоти (MHz)	Географічна область
868 MHz	0	868.3	Європа
915 MHz	1	906	Америка, Австралія
2		908	
3		910	
4		912	
5		914	
6		916	
7		918	
8		920	
9		922	
10		924	
2400 MHz	11	2405	Весь світ
12		2410	
13		2415	
14		2420	
15		2425	
16		2430	
17		2435	
18		2440	
19		2445	
20		2450	
21		2455	
22		2460	
23		2465	
24		2470	
25		2475	
26		2480	





## Додаток Є

## Росташування компонентів RFSerialBridgey





### Код програми визначення позиції вузлових пристроїв БСПС

Текст виконуваного фалу «run.m» [30]

```
clear;
clc;
close all;
cd 'Deploy Nodes'
square_random(30,30,0.1);
%square_random(1000,300,0.2,30)
%C_random([1000,300,300,700],240,0.2);
%square_regular(10,10,0.1,0.2);
%C_regular([1000,300,300,700],100,0.1,0.2);
%refnodecoor=[2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 9;];
%actualunknownnodecoor=[5 5];
comm_r=15;% radius
%%refnodecoor=[0 2;1 0;1 4;3 4;3 0;4 2];
%%refnodecoor=[0 0;2 0;4 0;3 4;1 4]; %trapecia
%%refnodecoor=[0 0;0 4;4 0;4 4;2 2]; %quinconce
%%refnodecoor=[0 2;1 0;2 4;4 2;3 0]; %pentagon
%$refnodecoor=[0 0;0 4;4 0;4 4]; %squer
%%refnodecoor=[0 0;2 4;4 0]; %tringel
%%refnodecoor=[0 0;1 1;2 2;3 3;4 4]; %diagonal
%%refnodecoor=[0 2;1 2;2 2;3 2;4 2]; %Line
%%refnodecoor=[2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 9;];
%%refnodecoor=[1 5;2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 1;8 9;9 5];
Distribution_Of_WSN;
cd ..;
cd 'Topology Of WSN';
comm_r=15;% radius
```

```

model='Regular Model';
%model='Logarithmic Attenuation Model';
anchor_comm_r=1;
try
calculate_neighbor(comm_r,anchor_comm_r,model,DOI);
catch
calculate_neighbor(comm_r,anchor_comm_r,model);
end
Topology_Of_WSN;
cd ..;
dist_available=true;cd 'MDS-MAP';MDS_MAP(dist_available);
cd ..
cd 'Localization Error'

```

### **Текст файла Topology\_Of\_WSN**

```

load '../Deploy Nodes/coordinates.mat';
load neighbor.mat;
figure;
hold on;
box on;
for i=1:all_nodes.nodes_n
for j=i+1:all_nodes.nodes_n
if neighbor_matrix(i,j)==1
plot(all_nodes.true([i,j],1),all_nodes.true([i,j],2),'-b');
end
end
end
plot(all_nodes.true(all_nodes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_n,1),all_nodes.true(all_n
odes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_n,2),'ro');

```

```

plot(all_nodes.true(1:all_nodes.anchors_n,1),all_nodes.true(1:all_nodes.anchors_n,2)
,'r*');
axis([0,all_nodes.square_L,0,all_nodes.square_L]);
try
disp(['DOI=',num2str(DOI)]);
catch
end
if anchor_comm_r==1
disp(['',num2str(sum(sum(neighbor_matrix))/all_nodes.nodes_n)]);
disp(['',num2str(sum(sum(neighbor_matrix(1:all_nodes.nodes_n,1:all_nodes.anchors
_n)))/all_nodes.nodes_n)]);
else
disp([':',num2str(sum(sum(neighbor_matrix(all_nodes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_
n,1:all_nodes.anchors_n)))/(all_nodes.nodes_n-all_nodes.anchors_n))]);
disp([':',num2str(sum(sum(neighbor_matrix(all_nodes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_
n,all_nodes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_n)))/(all_nodes.nodes_n-
all_nodes.anchors_n))]); end

```

### **Текст файлу для визначення похибки локалізації**

```

function [Localization_error,Unresolve_num]=calculate_localization_error()
% Localization_error
load result.mat;
figure;
hold on;
box on;
plot(all_nodes.true(1:all_nodes.anchors_n,1),all_nodes.true(1:all_nodes.anchors_n,2)
,'r*');%the anchors
Unresolved_unknown_nodes_index=find(all_nodes.anc_flag==0);%the unresolved
unknown nodes
Unresolved_num=length(Unresolved_unknown_nodes_index);

```

```

plot(all_nodes.true(Unresolved_unknown_nodes_index,1),all_nodes.true(Unresolved
_unknown_nodes_index,2),'ko');
resolved_unknown_nodes_index=find(all_nodes.anc_flag==2);%estimated locations
of the resolved unknown nodes
plot(all_nodes.estimated(resolved_unknown_nodes_index,1),all_nodes.estimated(res
olved_unknown_nodes_index,2),'bo');
plot(transpose([all_nodes.estimated(resolved_unknown_nodes_index,1),all_nodes.true
e(resolved_unknown_nodes_index,1)]),...
transpose([all_nodes.estimated(resolved_unknown_nodes_index,2),all_nodes.true(res
olved_unknown_nodes_index,2)]),'b-');
axis auto;
try
x=0:all_nodes.grid_L:all_nodes.square_L;
set(gca,'XTick',x);
set(gca,'XTickLabel',num2cell(x));
set(gca,'YTick',x);
set(gca,'YTickLabel',num2cell(x));
grid on;
catch
end

```

## Додаток 3

**Програмна реалізація методу вимірювання відстані між об'єктами за  
методом RSSI на мові C [31]**

```

PUBLIC void vTimer1ISR (uint32 u32DeviceId, uint32 u32ItemBitmap);
PUBLIC void vMeasureResponse(void);
PRIVATE uint32 u32ResponseTimeInMs = 0;
PUBLIC void vMeasureResponse(void)
{
/* set up timer 0 for count */
vAHI_TimerEnable(E_AHI_TIMER_1,
0,
FALSE,
TRUE,
FALSE);
vAHI_TimerClockSelect(E_AHI_TIMER_1,
FALSE,
TRUE); // gate input pin active high
vAHI_TimerStartRepeat(E_AHI_TIMER_1,
0x0000, // null value
16000); // 16000 with no prescaler is 1ms
/* register Timer0 interrupt */
vAHI_Timer1RegisterCallback(vTimer1ISR);
}
PUBLIC void vTimer1ISR(uint32 u32DeviceId, uint32
u32ItemBitmap)
{
u32ResponseTimeInMs++;
}

```

## Додаток И

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про  
апробацію результатів дисертації**

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 60 наукових праць, у тому числі 2 монографії, 25 статей у наукових фахових виданнях (з них 9 статей у виданнях іноземних держав, 9 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 патенти на корисну модель, 17 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 14 статей у інших виданнях.

**Список праць, опублікованих за темою дисертації.**

**Монографії**

1. Дуднік А.С. Комп'ютеризовані системи вимірювання механічних величин [Текст] / А. С. Дуднік, В. П. Квасніков. – Київ : Інтерсервіс, 2018. – 176 с. – ISBN 978-617-696-830-6.

2. Kvasnikov V. Relevance analysis of measurement mechanical quantities in the composition of the network “internet of things” and systems of professional cooperation during metrological studies [Текст] /V. Kvasnikov, A. Dudnik, Yu. Bondarenko // Relevant issues of development and modernization of modern science: the experience of countries of Eastern Europe and prospects of Ukraine: **monograph** / edited by authors. – Riga, Latvia : Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2018. – P. 144 -159. <http://dx.doi.org/10.30525/978-9934-571-26-8> 8 (іноземне видання)

**Статті у фахових виданнях**

3. Дуднік А.С. Спосіб підвищення продуктивності безпроводових комп'ютерних мереж на основі міжрівневої взаємодії та пристрій для його реалізації [Текст] / А.С. Дуднік, Є.В. Шевцова, О.О. Зубарева // Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2011. – Вип. № 4 (36). – С. 45 – 50. **(РИНЦ, WorldCat, BASE)**

4. Дуднік А.С. Метод застосування протоколу БТР для надійності передачі даних безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В.

Бондаренко// Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. № 3 (43). – С. 22 – 26. (**РИНЦ, WorldCat, BASE**)

5. Дуднік А.С. Динамічний алгоритм у перерозподілу потоку заявок в безпроводових комп'ютерних мережах [Текст] /А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2016. – Вип. № 4. – С. 102-104.

6. Дуднік А.С. Аналіз декомпозиції нижніх рівнів еталонної моделі OSI на прикладі пристрою підвищення продуктивності безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] /А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 1. – С. 66-69.

7. Дуднік А.С. Математичні моделі прогнозування для хмарних комп'ютеризованих систем [Текст] / А.С. Дуднік, Л.І. Кубушка В.О. Погіба // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 3. – С.98 -103.

8. Квасніков В.П. Аналіз приладів вимірювання відстані та безпроводних сенсорних мереж [Текст] /В.П. Квасніков, А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 4. – С.115 -118.

9. Дуднік А.С. Розробка мікропроцесорного частотоміра для комп'ютеризованих систем вимірювання відстані [Текст] /А.С. Дуднік // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. № 1. – С.162 -167.

10. Дуднік А.С. Застосування датчиків вимірювання механічних величин в комп'ютерній мережі «Розумний дім» [Текст] /А.С. Дуднік // Метрологія та прилади . – 2017. – Вип. № 5. – С.106 -110. (**Index Copernicus**)

11. Квасніков В.П. Наукові основи визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] /В.П. Квасніков, А.С. Дуднік// Метрологія та прилади . – 2018. – Вип. № 3. – С.21 -26. (**Index Copernicus**)

12. Дуднік А.С. Модель сенсорного комп'ютеризованого приладу вимірювання відстані [Текст] / А.С. Дуднік, В.П. Квасніков // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 1 (81). – С.114 -118. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-114-118](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-114-118) (**Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE**)

13. Дуднік А.С. Розробка методу підвищення продуктивності сенсорних мереж вимірювання відстані [Текст] /А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 3/2 (41). – С.114 -118. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.135486> (**Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE, РИНЦ**)

14. Дуднік А.С. Дослідження лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] /А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 4/2 (42). – С.35 -40. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141190> (**Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE, РИНЦ**)

15. Дуднік А.С. Аналітична модель вимірювання відстані за допомогою сенсорних мереж та оцінка похибки вимірювання [Текст] / А.С. Дуднік, В.П. Квасніков // Вісник Черкаського державного технологічного університету . – 2018. – Вип. №2 . С. 21 -26.

16. Квасніков В.П. Визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] / В.П. Квасніков, А.С. Дуднік // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2018. – Вип. № 1(12). С. 54 -60. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2018-1-12-52-58>

17. Дуднік А.С. Методи визначення відстані між об'єктами сенсорних мереж [Текст] /А.С. Дуднік // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 17. С. 40 -49. (**Norwegian Register for Scientific Journals, BASE, Citefactor, GIF, SIS**)

18. Дуднік А.С. Метод вимірювання відстані між об'єктами сенсорних мереж засобами мікропроцесорного фазометра [Текст] /А.С. Дуднік // Технічні науки та технології. – 2018. Вип. № 2(12). С. 136 -141. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-136-141](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-136-141) (**Index Copernicus, OJS, ResearchBib, WorldCat, BASE РИНЦ**)

19. Dudnik A. Method for measuring the distance between objects using a digital frequency measuring device [Текст] / A.Dudnik // European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2018. # 4. P. 19 -24. (**ULRICHSWEB, BASE,**



**EBSCO, eLIBRARY.RU, OpenAIRE, RePEc, ROAR, WorldCat)** (іноземне видання)

20. Dudnik A. Evaluation of wireless signal computerized systems of measurement of mechanical quantities at constant distance in medium fire [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2018. # 21. Vol. 2. P. 56 -60. (**Slideshare, eLIBRARY.RU, Issuu, Calameo**) (іноземне видання)

21. Dudnik A. Models and methods of growth of productivity of wireless networks in components of computerized systems of measurement of mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Sciences of Europe. – 2018. # 29. Vol. 2. P. 54 -60. (**DIIF, eLIBRARY.RU, GIF, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (іноземне видання)

22. Dudnik A. Development microprocessor device measuring power for computer systems measure the distance [Текст] / A.Dudnik // Sciences of Europe. – 2018. # 28. Vol. 1. P. 64 -68. (**DIIF, eLIBRARY.RU, GIF, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (іноземне видання)

23. Dudnik A. Development of mathematical models for the determination of to determine the distance between the nodes in sensor networks [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // East European Science Journal. – 2018. # 7(35). Vol. 2. P. 12 -14. (**Index Copernicus, eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI, Slideshare, Cosmos impact factor**) (іноземне видання)

24. Dudnik A. Method of devices wireless sensor networks and motion sensors for military purposes [Текст] / A.Dudnik, O. Cholishkina, Yu. Bondarenko // East European Science Journal. – 2018. # 6(34). Vol. 1. P. 37 -41. (**Index Copernicus, eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI, Slideshare, Cosmos impact factor**) (іноземне видання)

25. Dudnik A. Analysis of technology "internet of things" in the military sphere [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Colloquium-journal. – 2018. # 8(19). Vol. 1. P. 16 -19. (**Index Copernicus, ПИИЦ, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (іноземне видання)

26. Dudnik A. Analysis technology "internet of things" as a means of mechanical quantities measurement system "smart home" [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Colloquium-journal. – 2018. # 7(18). Vol. 3. P. 29 -30. (**Index Copernicus, ПИНЦ, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (іноземне видання)

27. Dudnik A. Modeling determine the distance between nodes in sensor networks computerized system for measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik // Spirit time. – 2018. # 8 Vol. 1. P. 14 -18. (**ПИНЦ, ScholarGoogle, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (іноземне видання)

### **Патенти на корисну модель**

28. Патент №60400 (Україна), МПК Н04В 7/005. Пристрій підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю [Текст] / А. С. Дуднік, Є.В. Шевцова, М.М. Яценко, О.О. Зубарева. – Реєстрац. номер заявки 201007469. Опубліковано в бюлетені №12 від 25.06.2011.

29. Патент №69626 (Україна), МПК Н04В 7/005. Безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок [Текст] / А. С. Дуднік, В.П. Якунін. – Реєстрац. номер заявки 201111748. Опубліковано в бюлетені №9 від 10.05.2012.

### **Тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій**

30. Дуднік А.С. Засоби підвищення якості передавання даних безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко // Управління, автоматизація та навколишнє середовище: III міжнар. наук.-практ. конф. 14 – 17 травня 2012 р.: тези допов.– Севастополь, 2012 р. С. 249 -253.

31. Дуднік А.С. Аналіз технічних характеристик пристроїв бездротових мереж [Текст] / А.С. Дуднік, Г.В. Єрмоленко // Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії: V міжнар. наук.-практ. конф. 30 – 31 серпня 2014 р.: тези допов.– Переяслав-Хмельницький, 2014 р. С. 203 -205.

32. Дуднік А.С. Застосування датчиків вимірювання механічних величин в комп'ютерній мережі «розумний дім» [Електронний ресурс] / А. С. Дуднік //

Метрологія і інформаційно-вимірювальна техніка: міжнар. наук.-практ. конф., 22 листопада 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – Режим доступу: <http://imt.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/11/ZASTOSUVANNYA-DATCHYKIV-VYMYRYUVANNYA-MEHANICHNYH-VELYCHYN-V-KOMP-YUTERNIJ-MEREZHI-ROZUMNYJ-DIM.pdf>

33. Дуднік А.С. Організація технології «інтернет речей» засобами безпроводових комп'ютерних мереж із застосуванням датчиків вимірювання механічних величин [Текст] / А. С. Дуднік // Машинобудування очима молодих: Прогресивні ідеї – наука – Виробництво: XVII міжнар. наук.-практ. конф., 01 – 03 листопада 2017 р.: тези допов. – Чернігів., 2017. – С. 220 – 221.

34. Дуднік А.С. Метод математичного прогнозування за допомогою часових рядів [Текст] / А.С. Дуднік, Л.І. Кубушка В.О. Погіба // Актуальні проблеми інформаційних технологій: наук.-практ. конф., 8 – 10 листопада 2017 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – С. 33.

35. Дуднік А.С. Рекомендації щодо застосування «пристрою підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю» та датчиків руху у військових цілях [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Кравченко, В.П. Квасніков // Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні Збройних Сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель: наук.-практ. конф., 30 листопада 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – С. 106 – 108.

36. Дуднік А.С. Визначення відстані між об'єктами на основі часу прибуття сигналу [Текст] / А. С. Дуднік // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 18 – 20 квітня 2018 р.: тези допов. – Кам'янець-Подільський., 2018. – С. 25 – 26.

37. Дуднік А.С. Організація технології «Інтернет речей» засобами безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси: X міжнар. наук.-практ. конф., 16 – 17 травня 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – С. 239 – 241.

38. Дуднік А.С. Взаимодействие технологий «интернет вещей» и «блэйчейн» при измерении механических величин [Текст] / А. С. Дуднік, Л. Мелконян // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси: XI міжнар. наук.-практ. конф., 22 – 23 травня 2018 р.: тези допов. – К., 2018. – С. 285 – 287.

39. Дуднік А.С. Аналіз пристроїв безпроводних вимірювальних сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Актуальні проблеми сучасної науки: XXXI міжнар. наук.-практ. конф., 29 червня 2018 р.: тези допов. – Москва–Астана–Харків–Відень., 2018. – С. 71 – 72.

40. Дуднік А.С. Методи обчислення потужності для визначення відстані між об'єктами на основі падіння рівня сигналу [Текст] / А. С. Дуднік // Актуальні проблеми сучасної науки: XXXII міжнар. наук.-практ. конф., 31 липня 2018 р.: тези допов. – Санкт-Петербург–Астана–Київ–Відень., 2018. – С. 71 – 72.

41. Дуднік А.С. Вимірювання локації об'єктів за допомогою сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: міжнар. наук.-практ. конф., 14 – 19 травня 2018 р.: тези допов. – Івано-Франківськ., 2018. – С. 71 – 72.

42. Дуднік А.С. Методи визначення координат на основі дальності сигналу та обчислення позиції розташування у пристроях сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 10 – 12 травня 2018 р.: тези допов. – Чернігів., 2018. – С. 173.

43. Квасніков В.П. Математична модель локалізації об'єктів за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] / В.П. Квасніков, А.С. Дуднік // Технічне регулювання, метрологія та якість: виклики сучасності: IX Всеукраїнська наук.-практ. конф., 17 – 18 травня 2018 р.: тези допов. – Одеса., 2018. – С. 59 -60.

44. Дуднік А.С. Аналіз сенсорного мережевого приладу вимірювання відстані між об'єктами [Текст] / А.С. Дуднік, О.Г. Чолишкіна, М.Г. Луцький //

Інноваційний розвиток науки нового тисячоліття: III міжнар. наук.-практ. конф., 25 – 26 травня 2018 р.: тези допов. – Чернівці., 2018. – С. 135 – 137.

45. Дуднік А.С. Будова та принцип роботи комп'ютеризованого лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А.С. Дуднік // Теорія і практика сучасної науки: III міжнар. наук.-практ. конф., 29 – 30 червня 2018 р.: тези допов. – Київ., 2018. – С. 100 – 102.

46. Дуднік А.С. Аналіз методів вимірювання механічних величин та принципів їх виконання [Текст] / А.С. Дуднік // Сучасні тенденції розвитку науки: III міжнар. наук.-практ. конф., 27 – 28 липня 2018 р.: тези допов. – Львів., 2018. – С. 82 – 85.

#### **Статті у інших виданнях**

47. Dudnik A. The concept of a sensory network measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik // International scientific journal "Internauka". — 2018. — №10. Vol. 2. P. 7 -10. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-10-3889> **(РИНЦ, ScholarGoogle, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

48. Dudnik A. The role of technology of professional interaction of "Internet Things" when measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Молодий вчений. — 2018. — №2. С. 15 -19. **(РИНЦ, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

49. Дудник А. С. Анализ технологии применения блокчейн совместно с технологией интернет вещей для обработки и хранения результатов измерений [Текст] / А. С. Дудник, О. Г. Чолышкина, М. Г. Луцкий // Молодий вчений. — 2018. — №5. С. 179 -183. **(РИНЦ, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

50. Дуднік А. С. Аналіз методів вимірювання відстаней між об'єктами за допомогою сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №3. С. 213 -216. **(РИНЦ, ОАІ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

51. Дуднік А. С. Дослідження похибки інформаційних систем вимірювання механічних величин [Текст] // Scientific Journal «ScienceRise». —

2018 — №7(48).С. 34 -37. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.140057>  
**(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

52. Дуднік А. С. Метод побудови комп'ютеризованого лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №6. С. 15 -18. **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

53. Дуднік А. С. Методи підвищення продуктивності пристроїв безпроводних вимірювальних сенсорних мереж [Текст] // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2018. — №12. С. 41 -46. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-12-3993> **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

54. Дуднік А. С. Приклади застосування безпроводних сенсорних мереж у якості засобів вимірювання механічних величин [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №4. С. 182 -184. **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

55. Дуднік А. С. Систематизація вимірювальних приладів відповідно до методів вимірювання механічних величин та принципів їх виконання [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №7. С. 168 -172. **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

56. Дуднік А. С. Метод вимірювання відстані між об'єктами в сенсорних мережах за допомогою цифрового частотоміра середніх значень [Текст] // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2018. — №13. С. 45 -49. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-13-4031> **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

57. Скуратовський Р.В. Властивості скрученої кривої Едвардса, можливість поділу точки навпіл і їх застосування в криптографії [Текст] / Скуратовський Р.В., А.С. Дуднік, Д.М. Квашук // Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. — 2017. — Вип. № 4 (60). — С. 71 — 78. **(РИНЦ, WorldCat, BASE)**

58. Дуднік А.С. Система покращеного передавання даних безпроводових комп'ютерних мереж стандарту IEEE 802.11. [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко// Наука і молодь: збірник наукових праць. – К.: НАУ, 2012. – Вип. № 11(12). – С. 113-116.

59. Дуднік А.С. Динамічний алгоритм управління перерозподілом мережевого трафіку у безпроводових інформаційних системах [Текст] / А. С. Дуднік // Проблеми модернізації України. – 2015. – Вип. № 1. – С. 126 -129.

60. Dudnik A. The concept of measuring mechanical quantities in "smart home" technology [Текст] / A. Dudnik, V. Lyudvychenko // Проблеми модернізації України. – 2018. – Вип. № 6. – С. 150 -151.

Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях, конгресах, з'їздах, семінарах, нарадах:

- 3<sup>а</sup> міжнародна НПК "Управління, автоматизація та навколишнє середовище" (м. Севастополь 2012 р.);
- 5<sup>а</sup> міжнародна НПК "Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії" (м. Переяслав-Хмельницький 2014 р.);
- міжнародна НПК "Метрологія і інформаційно-вимірювальна техніка" (м. Київ 2017 р.);
- 17<sup>а</sup> міжнародна НПК "Машинобудування очима молодих: Прогресивні ідеї – наука – Виробництво" (м. Чернігів 2017 р.);
- НПК "Актуальні проблеми інформаційних технологій" (м. Київ 2017 р.);
- НПК "Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні Збройних Сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель" (м. Київ 2017 р.);
- 8<sup>а</sup> міжнародна НПК "Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації" (м. Кам'янець-Подільський 2018 р.);

- 10<sup>а</sup>, 11<sup>а</sup> міжнародна НПК «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (м. Київ 2017 р., 2018 р.);
- 31<sup>а</sup>, 32<sup>а</sup> міжнародна НПК "Актуальні проблеми сучасної науки" (м. Москва–Астана–Харків–Відень, м. Санкт-Петербург–Астана–Київ–Відень 2018 р.);
- міжнародна НПК "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання" (м. Івано-Франківськ 2018р.);
- 8<sup>а</sup> міжнародна НПК «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернгів 2018 р.);
- 9<sup>а</sup> Всеукраїнська НПК "Технічне регулювання, метрологія та якість: виклики сучасності" (м. Одеса 2018 р.);
- 3<sup>а</sup> міжнародна НПК "Інноваційний розвиток науки нового тисячоліття" (м. Чернівці 2018 р.);
- 3<sup>а</sup> міжнародна НПК "Теорія і практика сучасної науки" (м. Київ 2018 р.);
- 3<sup>а</sup> міжнародна НПК "Сучасні тенденції розвитку науки" (м. Львів 2018 р.);
- 11<sup>а</sup> міжнародна НПК "Метрологія та вимірювальна техніка" (м. Харків 2018 р.).

Також результати дисертаційної роботи доповідались на наукових семінарах кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету.